



İÇİNDEKİLER / CONTENTS

| | Sayfa No |
|--|-----------|
| Araştırma Makaleleri / Research Article | |
| Ucan KARAKILINÇ, Bekir YALÇIN, Berkay ERGENE Tuz Yataklı Beslenmeli Eklenmiş İnatlarla Kullanılan Partiküllerin Uzunluk, Ayrışması ve Partikül İnhalat Yöntemleri Investigation on the Suitability of Powder Particulates Used in Powder Bed Feed Additive Manufacturing Methods | 801-810 |
| Mehmet Emin DEMİR, Yakın Hırsman ÇELİK, Erol KILIÇKAP Çam ve Karbon Elyasit Takviyeli Kompozitlerde Elyasit Çatışma, Yıkma, Kırılma Hızı ve Mesafesinin Alabastir Açınmaya Etkisi Effect of Fiber Type, Load, Sliding Speed and Distance on Abrasion Wear of Glass and Carbon Fiber Reinforced Composites | 811-817 |
| Güven YILMAZ Comparison of the Numerical Models for the Temperature Distributions of Non-Preheated Swirling Methane Flame | 819-826 |
| MUSTAFA YAVUZ DEMİR, L. İsmail YARANOVA Model Tabanlı Tasarım Metodları Kullanılarak Gerçek Zamanlı Bir Gözetim İşleme Sisteminin Tasarımı ve Gerçekleşmesi Design and Implementation of A Real-Time Image Processing System Using Model-Based Design Methods | 827-838 |
| Özcan PEKÇİN, Nispet ATAŞ Combustion Properties of Impregnated and Heat-Treated Wood Material Empirical Analysis of Fuel Index of Various Alkyd Resin Systems Ozellikleri | 839-845 |
| Mehmet İbrahim TALAN, Mehmet Rahim CANAL, Yusef AL CAN, Hilal KAYA, Murat ZINUROĞLU Karşıl Üznel Saldırıdan Temelli Elektronik Sağlık Sisteminin Geliştirilmesi Development of Electronic Health Record System Based on Karşıl Üznel Saldırıdan | 847-853 |
| Ferihan BAŞKAMAN, Hilmi ÖLMEŞ A Comparison of Copula Families on Dependence Structure of Extreme Order Statistics Uç Sıra İstatistiklerinin Bağımlılığı Yapısı Üzerine Kopula Ailelerinin Bir Karşılaştırılması | 855-862 |
| Zühre AYDIN YENİOĞLU, Vahan ATES Yenilenebilir Enerji Kullanımında Güneşli Etkinliklerin Veri Zarflama Analizi ile Değerlendirilmesi: Türkiye ve Yedigüç Ülkeleri Üzerine Evaluation of Renewable Efficiency Using Renewable Energy by Data Envelopment Analysis: Turkey and Seven European Countries: Example | 863-869 |
| Ali Talha AYHAN, Murat ÖZALP Sesim (Technological) Properties of Scotch Pine (Pinus Sylvestris Lapsky) and Eastern Beech (Fagus Orientalis Lapsky) Woods Impregnated With Alpha-X Chemical Alpha-X Kimyasalı ile Empregne Edilmiş Sürçam (Pinus Sylvestris Lapsky) ve Doğu Kayını (Fagus Orientalis Lapsky) Odunlarının Bazı Fiziksel Özellikleri | 871-877 |
| Barış ÖZÜL, Halil DEMİR, Mustafa TÜRKMEK The Effect of Mechanical Properties and The Cutting Parameters on Machinability of AISI 5140 Steel Cooled At High Cooling Rates After Hot Forging Soğuk Dövmeye Sonrası Yüksek Soğuma Hızlarında Soğutulan AISI 5140 Çeliğinin Mekanik Özelliklerinin ve Kesme Parametrelerinin İşlenebilirliğe Etkisi | 879-887 |
| Şehin ÖZSAHİN, Hilmi SİNGER Artıkın Yüzey Pürüzlülüğünü ve Adhezyon Dayanımını Yapay Sinir Ağları ile Tahmin Prediction of Surface Roughness and Adhesion Strength of Wood by Artificial Neural Networks | 889-900 |
| Nispet AYDIN, Abla BİTKİKOĞLU Türkiye'de Konut Tipi Binalarda Isınma Yoluyla Alınan Üçüncü Milyar Analizi Yöntemi ile Optimum Yalıtım Kalınlıklarının Belirlenmesi Determination of Optimum Insulation Thickness Based on Heating Load by Life-Cycle Cost Analysis for Residential Buildings in Turkey | 901-911 |
| Abdül Cavad SÜCRİN, Ahmet ÖZEK, Ceyhan KARPUZ Çoklu Robotlarda İşbirlikli Davranışın Karşılaştırılması ve Bulunak Mantık Yaklaşımı Comparison of Cooperative Behaviors in Multiple Robots and Fuzzy Logic Approach | 913-919 |
| Hüseyin KESKİNER, Turgut Külpüstürü Ahalisiye Ağırlıklı İkinci Bası Kapsama Alanının Farklı Ağı Boyutları ve Döndür Sayılarında A2 Yaşam Stresine Etkisi The Effect of the Range of Cluster Head on the Lifetime of Wireless Sensor Networks Under Various Sizes of Network and Number of Nodes | 921-926 |
| Fatih ERDEMİR, Murat ŞİMŞEK, Özgür Plastik Parçalarda Bir Esneyecek Kliflenmiş Bağlıtım Modal Analizi Modal Analysis of A Snap-Fit Joint Model For Plastic Parts | 927-933 |
| Emel HENNER Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes and Micro Cellulose Reinforced Poly (Vinyl Alcohol) Hybrid Composite Filas: Characterization and Reprocessing Performance | 934-945 |
| Hüseyin GÖRGE, İbrahim ÇİFTÇİ, Harun GÖKÇEK Frezalama Operasyonlarının Kesme Parametrelerinin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analizi ile İncelenmesi - Safla Molibdenin İşlenmesi Üzerine Bir Çalışma An Investigation Into The Experimental and Finite Element Analysis of Cutting Forces in Milling: A Study on Machining of Pure Molybdenum | 947-954 |
| Mehmet TEKALIMAZ, Gülhan HAYDARLAR, Emel ER K200 Kayı Çeliğinin Değişken Beslenmişlik Durumunda EMI Yöntemi ile İncelenmesi Investigation of The R260 Rail Steel Behavior At Varying Temperatures By EMI Method | 955-960 |
| Hakan TANIRDOĞRAN Çok Boyutlu Karışımın Doğrusal Olmayan Mekanik Davranışını İçeren Matematiksel Kullanarak Sonlu Elemanlar Yöntemi Uygulanması Finite Element Method Application For Nonlinear Mechanical Response of Three-Dimensional Beams Using Mathematica | 961-966 |
| Fatih AKTAŞ, Sahin KARASLAN, Mehmet KILIÇ, Nuri ÇELİK Farklı Oranlarda Etanol ve Metanol Karışımının Tam Yık Alınma Dört Silindirik Dizel Bir Motorun Performans ve Emisyon Değerlerine Olan Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi Numerical Investigation of The Effects of Different Percentage Ethanol and Methanol Addition On Performance and Emission Values of A Four Cylinder Diesel Engine At Full Load | 967-977 |
| Hüseyin ERAY, Nihal PASLAN, İbrahim HANBAY Dikörtgen Parçalar ile İki Boyutlu Kesme ve Paketlenme Problemi için Sezgisel Yöntemler Kullanılan Bir Hibrit Metodoloji A Hybrid Methodology Using Heuristic Methods for Two-Dimensional Cutting and Packing Problem With Rectangular Pieces | 979-988 |
| Hüseyin POLAT, Saadet ÖZÇELİK Heterojen Medikal İlaç Verilerinin Depolanmasında İlişkisel Olmayan Veritabanına Dayalı Bir Yaklaşım An Approach To Non-Relation Database-Based In The Storing of Heterogeneous Medical Lot Data | 989-998 |
| Elker Uzun, Uğur Selek, Kıvanç İSLEYEN Hareketli Hesaplı - Heterojen Filolu İHA Rotalama Problemi için Yeni Bir Çözüm Yaklaşımı A New Solution Approach For UAV Routing Problem With Moving Target - Heterogeneous Fleet | 999-1016 |
| Ceyhan ATILADINÇER, Ali Mert ERDEK, Ayşe KARAKOÇLU, Nuri YILDIZ Preparasyon of Chitosan and Glycol Chitosan Coated Magnetic Nanoparticles Loaded with Carbopolin As Anticancer Drug Anticancer Use: Olarak Karşılaştırılabilir Yüklümlenmiş Kütösam ve Glikol Kütösam Kaplı Manyetik Nanomercilerin Hazırlanması | 1017-1022 |
| Sevket KIZIR Denge Kontrol Sisteminin QR ile Gerçek Zamanlı Durum Gözetimi ile Beslenmesi Kontrolü Real Time Full State Feedback Control of a Sessam System Based on QR | 1023-1030 |
| Hatice EVLEN, Merve Ayfer ÖZDEMİR, Aydin CALIŞKAN Dönümlü Oranlamam PL ve PET Malzemelerinin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri Effects of Filling Percentage on Mechanical Properties of PL and PET Materials | 1031-1037 |
| Ferhat KILINÇ, Ertan BUVURUK, Mustafa CANER Sivas ili Sartonunda Yayı Toprak Kaynaklı İst. Pompanın Isınma ve Soğutma İçi Performans Analizi Heating and Cooling Performance Analysis of The Horizontal Ground Source Heat Pump For Strass Conditions | 1039-1044 |
| İsmail HOCAOĞLU, Tayfun UYGUNOĞLU Alternatif Çerçeve Uygulanmış Betonlu S/C Oranının ve Hiperkalsiyerleşme Oranının Priz Bitiş Stres ve İstirahet Dayanımı Etkilerinin Arştırılması Investigation of The Impacts of W/C Ratio and Hyper-Plasticizer Ratio on Final Setting Time and Compressive Strength for the Concrete with Alternating Cement Applied | 1045-1051 |
| Deniz AKRAY, Rıfat ALTINDAĞ, Nazmi SENGÜN Geleneksel Yöntemle Açılan Karayolu Tünelindeki Çalışanların Günlük Maruziyetlerinin Değerlendirilmesi Assessment of Noise Exposure Among Workers in Highway Tunnels Constructed by Conventional Method | 1053-1060 |
| Kürşat YILDIZ, Çağrı TABAK İki Bölge Üzerine Türkiye ve Meksika Lojistik Sektörünün Karşılaştırılması Turkey and Mexico Logistics Sector Comparison | 1061-1067 |
| Savaş EKREN Tersinim Baskın Analizi Üzerine Katmanlı Funksiyonlu Graded Thin Beams Under Clamped-Clamped Boundary Conditions Thin-Shell Buckling Analysis of Axially Layered Functionally Graded Thin Beams Under Clamped-Clamped Boundary Conditions | 1069-1074 |
| Hakan GÜNDÜZ, Ahmet KAZAN, H. Bayram KARADAG Rasyonel Yüzeyler Üzerine Üç Boyutlu Kurbağın Üzerine Etkileri Rational Surfaces Generated by Cubic Hermite and Cubic Bézier Curves | 1075-1082 |
| Ayhan HANCIERLİKOĞLU, Lale Karahatir Muhammed EL HADAD, Emel KURT İmplementasyon of Real Time Analog Secure Image Communication System Via A Chaotic Circuit Kaoslu Devre ile Gerçek Zamanlı Analog Güvenli Gözetim İletişim Sisteminin Uygulanması | 1083-1092 |
| Rahve İZZİN ARSLAN, Merve Özcan DİNÇİTAŞ, Sedat DİRİCİ Etkileri Karakter Tanıma Üzerine Histogram Metodu Kullanılarak Yapılan Çalışmaların İncelenmesi Effects of Character Recognition With Shell Histogram Method Using Plate Characters | 1093-1099 |
| Enis BARUTÇU, Yusuf ÖZALIMLAR Plastik Karakterlerin Kullanılarak Shell Histogram Yöntemi ile Karakter Tanıma Experimental Verification of Cell Shape-Collapse Relationships in Metallic Foams by Photoelasticity Method | 1101-1110 |
| Mehmet Barış SENO, Ayhan DEMİR, Metin BAĞCI, Yücel En Etkili Lojistik Faktörleri Belirlemek için Bulunak Bir ÇIKKV Yaklaşımı A Fuzzy MCDM Approach to Determine the Most Influential Logistic Factors | 793-800 |

POLİTEKNİK DERGİSİ - JOURNAL OF POLYTECHNIC

VOLUME / CİLT 22 NUMBER / SAYI 4 ARALIK / DECEMBER 2019



Journal of Polytechnic
POLİTEKNİK
DERGİSİ

VOLUME / CİLT 22 NUMBER / SAYI 4 DECEMBER / ARALIK 2019



Politeknik Dergisi

Journal of Polytechnic

Sahibi / Owner
Prof. Dr. İbrahim USLAN
Rektör / Rector

Yayın Yönetmeni / Publishing Manager
Prof. Dr. Adnan SÖZEN
Dekan / Dean

Editör Yardımcısı / Associate Editor
Doç. Dr. M. Tolga ÖZKAN
Gazi Üniversitesi / Gazi University

Editör / Editor
Prof. Dr. Adnan SÖZEN
Gazi Üniversitesi / Gazi University

Editör Asistanı / Assistant Editor
Doç. Dr. Serhat KARYEYEN
Gazi Üniversitesi / Gazi University

YARDIMCI EDİTÖRLER/ASSOCIATE EDITORS

Prof. Dr. Jose Manuel LOPEZ-GUEDE, University of the Basque Country
Prof Sanjeevikumar PADMANABAN, University of Johannesburg
Prof. Dr. Hacı Bayram KARADAĞ, İnönü Üniversitesi
Prof. Dr. İhsan ALP, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Hilal KURT, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ, Çankırı Karatekin Üniversitesi
Prof. Dr. Figen BALO, Fırat Üniversitesi
Prof. Dr. Zafer TEKİNER, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Hakan KESKİN, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Murat YÜCEL, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Bünyamin CİYLAN, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa ÖZER, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Hamit SOLMAZ, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Hülya DURMUŞ, Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Kasım SERBEST, Sakarya Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Amjad ANVARI-MOGHADDAM, Aalborg University

YAYIN DANIŞMA KURULU/EDITORIAL ADVISORY BOARD

| | |
|--|---|
| Abid ABU-TAIR , Berzeit University | Murat HOŞÖZ , Kocaeli Üniversitesi |
| Adel NASİRİ , University of Wisconsin Milwaukee | Musa ATAR , Gazi Üniversitesi |
| Ali Kemal YAKUT , Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi | Mustafa AKTAŞ , Gazi Üniversitesi |
| Arcan DERECİOĞLU , Orta Doğu Teknik Üniversitesi | Myung Hyun KİM , Kyung Hee University |
| Arif WANI , California State University | Nadire Şule ATILGAN , Hacettepe Üniversitesi |
| Ayhan ÖZÇİFTÇİ , Aksaray Üniversitesi | Nizamettin KAHRAMAN , Karabük Üniversitesi |
| Bekir Sami YILBAŞ , King Fahd University | Nobumasa MATSUI , Nagasaki University |
| Dilek KUMLUŞAŞ , Dokuz Eylül Üniversitesi | Nusret AS , İstanbul Üniversitesi |
| Engin ÖZDEMİR , Kocaeli Üniversitesi | Oğuz TURGUT , Gazi Üniversitesi |
| Erol ARCAKLIOĞLU , Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi | Osman ISIKAN , Marmara Üniversitesi |
| Farzollah MIRZAPOUR , University of Zanjan | Peter LUND , Helsinki University of Technology |
| Hakan YAVUZ , Çukurova Üniversitesi | Ramazan BAYINDIR , Gazi Üniversitesi |
| Hamit SARUHAN , Düzce Üniversitesi | Ramazan KÖSE , Dumlupınar Üniversitesi |
| Hani H.W.SAIT , King Abdulaziz University | Ramazan YILMAZ , Sakarya Üniversitesi |
| Henryka Danuta STRYCZEWSKA , Politechnika Lubelska | Recep ÇALIN , Kırıkkale Üniversitesi |
| Hüseyin AKILLI , Çukurova Üniversitesi | Recep YAMANKARADENİZ , Bursa Uludağ Üniversitesi |
| Hüseyin Rıza BÖRKLÜ , Gazi Üniversitesi | Rodica MILICI , Stefan cel Mare Suceava University |
| İbrahim DİNÇER , University of Ontario, Institute of Technology | Saffa B. RIFFAT , Nottingham University |
| İbrahim SEFA , Gazi Üniversitesi | Sare SAHİL , Gazi Üniversitesi |
| İhsan KORKUT , Gazi Üniversitesi | Saw Sor HEOH , INTI International University |
| İlhami ÇOLAK , İstanbul Gelişim Üniversitesi | Sing LEE , Institute for Plasma Focus |
| İlker USTA , Hacettepe Üniversitesi | Souad A.M.ALBATHI , International Islamic University of Malaysia |
| İshak KARAKAYA , Orta Doğu Teknik Üniversitesi | Tayfun MENLİK , Gazi Üniversitesi |
| Jamal KHATIB , University of Wolverhampton | Turgay AKBULUT , İstanbul Üniversitesi |
| Jerzy SMARDZEWSKI , Ponzan University | Ulvi ŞEKER , Gazi Üniversitesi |
| John KINUTHIA , University of South Wales | Yasin VAROL , Fırat Üniversitesi |
| Mahmood GHORANNEUISS , Azad University | Yılmaz ARUNTAŞ , Gazi Üniversitesi |
| Metin GÜRÜ , Gazi Üniversitesi | Yunus ÇENGEL , Nevada Üniversitesi |
| Metin İPEK , Sakarya Üniversitesi | |

| | | |
|--|-------------------------|---------------------------------|
| Cilt / Volume : 22 | Sayı / Issue : 4 | Aralık / December : 2019 |
| <p>Politeknik Dergisi Gazi Üniversitesi tarafından yılda dört sayı olarak yayınlanmaktadır / Journal of Polytechnic has been published four issues per year by Gazi University</p> | | |

| BU SAYIYA (CİLT 22 SAYI 4) KATKI VEREN HAKEMLER (REVIEWERS) | |
|--|----------------------------|
| Abdulkadir CENGİZ | Mehmet Keskin KILIÇ |
| Adnan AKKURT | Mehmet KOZAK |
| Ahmet ÖZDEMİR | Meral ÖZER |
| Ahmet UYUMAZ | Mesud KAHRİMAN |
| Alper ÖREN | Metin KAPIDERE |
| Ayhan TUTAR | Musa ATAR |
| Aysun COŞKUN (2 kez) | Mustafa Bahadır ÖZDEMİR |
| Ayşe METİN KARAKAŞ | Mustafa KÜÇÜKTÜVEK (2 kez) |
| Bahadır YÜZBAŞI | Necaattin BARIŞCI |
| Barış KARAKAYA | Necmi KAHRAMAN |
| Burak ARICIOĞLU | Nuray ÇELEBİ |
| Cenk KARAKURT | Nurcan KAPUCU |
| Egemen TEOMETE | O. Ayhan ERDEM |
| Emine BAYRAKTAR | Okan KON |
| Emre ARABACI | Onur ÜLKER (3 kez) |
| Erol BURDURLU | Özgür ÖZDİLLİ |
| Erol SOLMAZ | Recep DEMİRCİ |
| Fuat KARA | Rukiye KARAKIŞ (2 kez) |
| Gökhan GÖKDERE | Sabri KOCER |
| Halil DEMİR (2 kez) | Selçuk Kürşat İŞLEYEN |
| Halil Turgut ŞAHİN | Serhat KARYEYEN |
| Harun YAKA | Seyfi POLAT |
| Hasan KAYA | Süleyman GÜNDÜZ |
| Hüseyin PELİT (2 kez) | Talip ÇELİK |
| İbrahim ÇİFTÇİ | Tuncer DİLİK |
| İhsan TOKTAŞ | Veysel ALCAN |
| İnan ÜNAL | Volkan KALEM |
| İsmail ATACAĞ | Volkan SEZER |
| Kaplan KAPLAN | Yılmaz KOÇAK |
| M. Ali AKCAYOL | Yunus KAYIR |
| M. Tolga ÖZKAN | Yücel KOÇYİĞİT |
| Mahmut İZCİLER (3 kez) | Zafer TEKİNER (6 kez) |
| Mehmet BEKTAŞ | |

Yazışma Adresi / Correspondence Address :

Politeknik Dergisi Editörlüğü
Gazi Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi
Tanıtım ve Yayın Müdürlüğü
06500 Teknikokullar
ANKARA –TÜRKİYE

Tel : 0312-202 34 12

Fax : 0312-212 00 59

Elektronik Posta Adresi / e-mail : politeknik@gazi.edu.tr

Teknik Sorumlu / Technical Manager: **Erdem ÇİFTÇİ**

Dizgi / Compositor: **İdris ÖZÇELİK**

e - ISSN : 2147-9429



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Toz yataklı/beslemeli eklemeli imalatta kullanılan partiküllerin uygunluk araştırması ve partikül imalat yöntemleri

Investigation on the suitability of powder particulars used in powder bed/feed additive manufacturing and powder manufacturing methods

Yazar(lar) (Author(s)): Uçan KARAKILINÇ¹, Bekir YALÇIN², Berkay ERGENE³

ORCID¹: 0000-0001-7782-3580

ORCID²: 0000-0002-3784-7251

ORCID³: 0000-0001-6145-1970

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Karakılınç U., Yalçın B. ve Ergene B., “Toz yataklı/beslemeli eklemeli imalatta kullanılan partiküllerin uygunluk araştırması ve partikül imalat yöntemleri”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 801-810, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.423707

Toz Yataklı/Beslemeli Eklemeli İmalatta Kullanılan Partiküllerin Uygunluk Araştırması ve Partikül İmalat Yöntemleri

Araştırma Makalesi / Research Article

Uçan KARAKILINÇ¹, Bekir YALÇIN^{2*}, Berkay ERGENE²

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, YETEM Araş. ve Uyg. Merkezi, Tasarım ve İmalat Birimi, 32260, Isparta

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta

(Geliş/Received : 15.05.2018 ; Kabul/Accepted : 28.09.2018)

ÖZ

Toz metalürjisi (TM); seramik ve metal esaslı partiküllerin preslenmesi ve sinterlenmesi ile endüstriyel parça imalatı olarak bilinmekte ancak; lazer, makine, tasarım ve yazılım teknolojilerinin bir araya getirildiği eklemeli imalat yöntemi olarak adlandırılan yeni bir teknolojiyi bünyesine almıştır. Günümüz eklemeli imalat teknolojisi ile, polimer, seramik ve metal esaslı malzemelerin partikül (toz), tel, plaka/sac ve eriyik formları uygun şartlarda lazer, elektron ve ultraviyole ışınları kullanılarak katmanlı bir şekilde kullanışlı prototip ve/veya endüstriyel parça imalatı mümkün hale gelmiştir. Bu çalışmada, özellikle toz yataklı/beslemeli eklemeli imalat yöntemleri, bu yöntemlerde kullanılan partiküllerin karakterleri ve toz imalat yöntemleri ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır. Ayrıca yapılan bu literatür araştırmasında, partikül tane boyutunun, şeklinin, fiziksel özelliklerinin ve kimyasal saflığının, toz yataklı/beslemeli eklemeli imalat ile elde edilen ürünlerin özelliklerine etkisi ifade edilmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Toz Metalürjisi, eklemeli imalat, toz karakteri.

Investigation on the Suitability of Powder Particulars Used in Powder Bed/Feed Additive Manufacturing and Powder Manufacturing Methods

ABSTRACT

Powder metallurgy (P/M) is known as an industrial part manufacturing by powder pressing and sintering using ceramic and metal based particulars, but, P/M method has incorporated the additive manufacturing as a new method which is combined in technologies of laser, machine, design and software. The manufacturing of prototype and/or useful industrial parts has become possible as layer upon layer with today's additive manufacturing technology by using suitable laser, electron and ultraviolet beam in form of powder, wire, sheet and melt from polymer, ceramic and metal based materials. The literature survey has been done about the powder bed/feed additive manufacturing methods, the powder characterizations used in these methods and powder manufacturing methods in this study. In addition, the effect of dimension, shape, physical properties, and chemical purity of powders on the product properties manufactured by powder bed/feed additive manufacturing can be expressed with respect of investigations in the literature.

Keywords: Powder metallurgy, additive manufacturing, powder character.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geleneksel Toz Metalürjisi (TM), teknolojik malzemelerin seri olarak üretilmesine çok uygun ve nispeten küçük parçaların çok sayıda ve ekonomik üretimini sağlayan “son şekle yakın üretim” metodu olarak bilinmektedir. Bu yöntem, metal partiküllerin (tozların) imal edilmek istenen parçanın şekli verilmiş kalıp-zımba takımları ile sıkıştırılmasını ve daha sonra fırın ortamında sinterleme işlemlerini kapsamaktadır.

Tozun plastik deformasyon teknikleri; tek ve çift etkili soğuk/sıcak presleme, izostatik sıcak/soğuk presleme, toz enjeksiyon presleme olarak sıralanmakta olup ve bu uygulamaların özellikli, karmaşık şekilli, gözenekli ve

geniş alarım içeriğine sahip endüstriyel parçaların imalatı için sürekli geliştirilen bir imalat yöntemidir [1]. Geleneksel toz metalürjisinde kullanılan giriş malzemesi, metal ya da seramik tozlardır [2]. TM teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak, makine, yazılım, tasarım, lazer ve toz üretim teknolojilerinin 1980’den sonra hızla gelişmesi sonucu, TM prototip üretim amaçlı dijital bir tasarımın plastik, metal ve seramik esaslı malzemelerden katmanlı imalat olarak adlandırılan bir teknolojiyi bünyesine almıştır. Ancak, çoğu araştırmacı, bu dinamik teknolojiyi eklemeli imalat yöntemi olarak değerlendirmekte ve üç boyutlu yazdırma/baskı (3-D Printing) olarak da nitelendirmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalara bakıldığında, başlangıçta prototip üretim amaçlı sektöre giren eklemeli imalatın özellikle medikal, havacılık, otomotiv, tüketici ürünleri, savunma

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : bekiryalcin@sdu.edu.tr

ve akademik sektörlere nüfuz ettiği anlaşılmakta olup, 2023 yılında da 21 milyar dolar pazar payına sahip olacağı ileri sürülmektedir [3]. Küresel bir danışmanlık şirketi olan Lux Research tarafından yürütülen bir araştırmada [4], otomotiv, medikal ve havacılık endüstrilerinde 3-B baskı kullanımının giderek arttığı ve buna bağlı olarak pazar payının %84 mertebesinde artacağı rapor edilmektedir. Bu bağlamda, sektörlerin imalat taleplerini karşılamak için değişik eklemeli imalat metotları geliştirilmiş ve çok geniş ürün yelpazesinin 3-B yazdırma olarak da adlandırılan bu teknolojiler ile imal edilebildiği ifade edilmektedir [5]. Bu gelişimlere bağlı olarak, ASTM tarafından eklemeli imalat teknolojileri araştırma grubu kurularak, eklemeli imalat yöntemleri ASTM F42' ye göre sınıflandırılmış ve standart altına alınmıştır. Bu standart incelendiğinde, eklemeli imalat genel olarak besleme malzemesinin formuna göre (toz, tel, sac ve eriyik), besleme malzemesine göre (plastik, metal, seramik, kağıt, mum, kompozit vs), kullanılan ışının tipine göre (lazer, ultraviyole, elektron gibi) ve yapılan işleme göre (ergitmeli/sinterlemeli/yapıştırıcı gibi) sınıflandırılarak yedi temel eklemeli imalat yönteminin ve bu yöntemlerin altında da toplam on beş eklemeli imalat metodun mevcut olduğu görülmektedir [6]. Ana yöntemler, fotopolimerizasyon, metal ekstrüzyon, malzeme püskürtme, yapıştırıcı imalat, toz destekli, direkt enerji depolama ve levha/sac laminasyon olarak sıralanmakta olup, bunlardan malzeme püskürtme, yapıştırıcı, toz destekli ve direkt enerji depolama yöntemlerinin metal esaslı ürünlerin imalatında tercih edildiği anlaşılmaktadır [6]. Şekil 1' de görüleceği üzere,

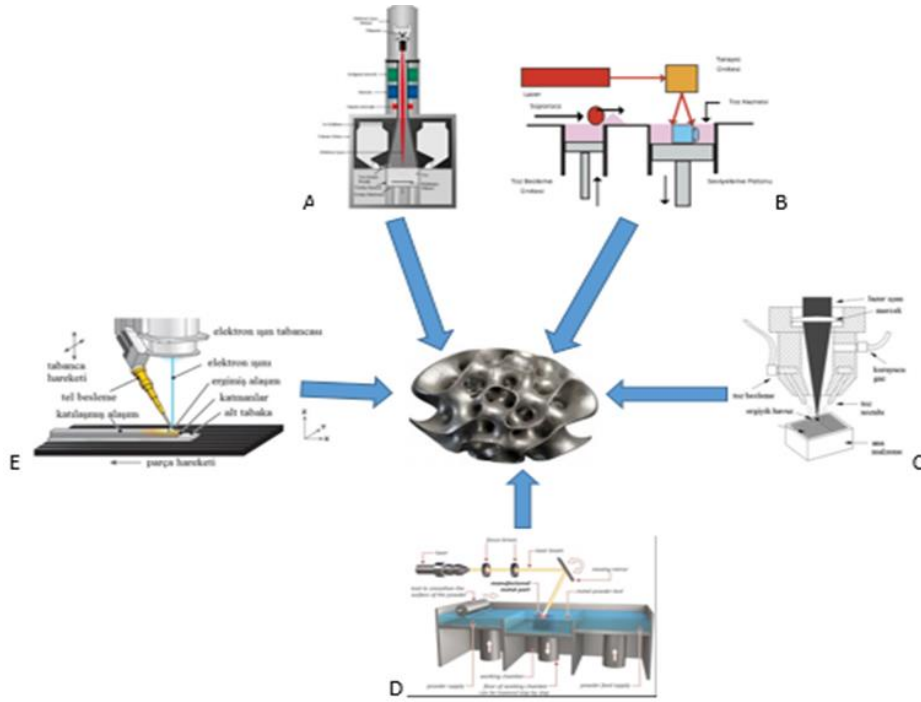
giriş malzemesi formuna göre sınıflandırılan eklemeli imalat yöntemlerinden, özellikle giriş malzemesi toz formunda olan metotlar bu çalışmada ele alınmıştır.

2. TOZ YATAKLI/BESLEMELİ VE PÜSKÜRTMELİ EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ (POWDER BED/FEED and SPRAY ADDITIVE MANUFACTURING METHODS)

Toz yataklı lazer ergitmeli ve/veya sinterlemeli sistemlerde; toz malzemeyi eritmek veya sinterlemek için lazer veya elektron ışını kullanılmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan ışınların çapı genellikle 20 ile 200 µm aralığında olup, 20-80 µm aralığındaki tozlar imalat platformuna serildikten sonra bu ışınların marifetiyle üretilmek istenen üç boyutlu tasarım taranarak ilk katman ya da tabaka oluşturma prensibine dayanır. İlk katmanın imalatından sonra imalat platformu tek bir katman kalınlığı kadar aşağıya indirilir ve toz serme pabucu ilk katmanın üzerine yeni toz tabakasını serer ve üretilmek istenen üç boyutlu cisim elde edilinceye kadar bu işlem tekrarlanmaktadır. Toz yataklı ve püskürtmeli eklemeli imalat yöntemlerinden yaygın olanları, Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Seçici Lazer Ergitme (SLM), Elektron Işın Ergitme (EBM), Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS), Lazer Geliştirilmiş Net Şekillendirme (LENS), Elektron Işın Eklemeli İmalat (EBAM) olarak bilinmekte ve Şekil 2'de gösterilmiş olup aşağıda bu yöntemler şematize edilmiştir.

| EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--|---------------|---------|----------------------|----------------|---------|-----------------|-------------------|--------------------|-----------------|-----|------------------|-----|-------|
| İşlem | Lazer Kaynaklı Eklemeli İmalat Yöntemi | | | | | | Sıcak Extrüzyon | Malzeme Püskürtme | Malzeme Yapıştırma | Elektron Işını | | | | |
| | Lazer Ergitme | | | Lazer Polymerization | | | | | | | | | | |
| İşleme Şekli | | | | | | | | | | | | | | |
| ÜRETİM YÖNTEMLERİ | | (M) | | (M) | | (M) | | (M) | | (M) | | (M) | | |
| | SLS | Metal/Plastik | DMD | Metal | SLA | Plastik | FDM | Komp. + Kağıt | 3DP | Metal + Plastik | LOM | Kompozit + Kağıt | EBM | Metal |
| | SLM | Metal | LENS | Metal | SGC | Plastik | Robo-casting | Komp. + Kağıt | LJP | Plastik | SFP | Kompozit + Kağıt | | |
| | DMLS | Metal | SLC | Metal | LTP | Plastik | | | MJP | Plastik | | | | |
| | | | LPD | Metal | BIS | Plastik | | | BPM | Plastik | | | | |
| | | | | HIS | Plastik | | | Termo-jet | Plastik | | | | | |
| Kullanılan metaryal cinsi | Toz | | Sıvı | | Katı | | | | | | | | | |
| (M) Malzeme | Metal | | Plastik | | Kompozit/Kağıt | | | | | | | | | |

Şekil 1. Eklemeli imalat yöntemlerinin işlemlerine göre sınıflandırılması (Classification of additive manufacturing methods according to their operations) [7]



Şekil 2. Toz yataklı ve püskürtmeli eklemeli imalat yöntemlerinden bazıları, (Some of the additive manufacturing methods from powder bed and spray additive manufacturing) a) EBM, b) SLM, c) LENS, d) DMLS, e) EBAM

SLS (Selective Laser Sintering)' de; haznenin içine konulan toz haldeki malzeme, lazer ışını yardımıyla, önceden belirlenmiş bir geometri dâhilinde sinterlemeye tabi tutulur. Bu yöntemde, imalat platformundaki toz katmanını sinterlemek için lazer ışını prosesteki hareketli aynaya gönderilir. İmalat platformuna yansıtılan lazer ışını ile katmanın sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra, alt kademeye geçilerek imalat döngüsü parça üretilene kadar devam eder. Bu yöntemde, toz platformda yığılı olduğu ve ürünü desteklediği için destek malzemesinin kullanımına gerek duyulmamaktadır. Bu sayede, hem yüzeyde pürüzlülüklerin oluşması minimize edilirken, hem de malzeme israfı en aza indirgenebilmektedir. Orta düzeyde yüzey kalitesine sahip SLS yönteminin, nispeten hızlı bir yöntem olması ve bazı metalik tozlar, naylon, poliamid, polyester ve çeşitli elastomer esaslı tozlar ile ürün elde edilebilmektedir. Gibson [8] yaptığı bir çalışmada; her bir malzeme için uygun SLS parametresinin seçilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Mercelis vd.[9], bu yöntemin dezavantajını ise, kalıntı gerilmelerin çok yüksek değerlere ulaştığını ve üretilen parçaların uç noktalarında çeki, ortalarında ise bası gerilmelerinin meydana geldiğini rapor etmektedirler. Ayrıca aynı çalışmada, üretilen malzemenin şekli, türü, sinterleme biçimi/yönü gibi parametrelerin, kalıntı gerilmelerini değiştirdiği de vurgulanmaktadır.

SLM/DMLS (Selective Laser Melting/Direct Metal Laser Sintering); her iki eklemeli imalat yönteminde, SLS' ye benzer bir prensiple parça üretilmektedir. DMLS, tozun kimyasal olarak kaynaşana kadar ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklığa ısıtılarak sinterlenmesi ve

SLM' de ise tozun tam ergitilmesi ile imalat gerçekleşmektedir. Ayrıca, DMLS yönteminde alaşımların, SLM' de ise alüminyum gibi tek bileşenli metallerin kullanıldığı ifade edilmektedir [10]. SLS' nin aksine, SLM ve DMLS yöntemlerinde, imalat sürecinde oluşan yüksek kalıntı gerilmelerini en aza indirmek için toz destek elemanına (support) ve iç gerilme giderme tavlamasına ihtiyaç duyulmaktadır. Strano [11] yaptığı çalışmada; lazer ertitiminin sinterlemeye göre, daha iyi yüzeyler üretilmesine imkân sağladığını ve bu yöntem ile sinterlemede elde edilemeyen sıcaklık değerlerine ulaşabileceğini, böylece yüzey tanımlamasının daha iyi yapılarak nispeten daha iyi yüzey kalitesine sahip ve aynı zamanda mekanik özelliklerin de sinterlemeye göre daha başarılı olduğunu belirtmektedir.

EBM (Electron Beam Melting)' de; toz partiküllerini ertirmek için lazer yerine yüksek enerjili bir elektron ışını kullanılmaktadır. Odaklanan elektron ışını, istenen geometrik şekli esas alarak serilen ince toz katmanını tarar ve bu kesit alan üzerinde lokal ertitmeyi sağladıktan sonra eriyiğin katılaşması ile katman oluşumu sağlanmaktadır. Yapı olarak SLM' deki gibi, tozların ertilmesi ve eriyik havuzunda soğuyarak katılaşması ve böylece katmanın oluşturulması, üretim haznesinin yüksekliğinin değiştirilmesi ile de katmanların üst üste üretimi yapılmaktadır. EBM' in, yüksek mukavemetli veya yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulan uygulamalar için ideal olduğu, bu yöntem ile %95 toz geri kazanımının sağlandığı, dövme ile elde edilen titanyum parça ile kıyaslanabilir olduğu ve döküm titanyum parçadan ise daha nitelikli parçaların üretilbildiği ifade edilmektedir [12]. EBM' de güç kaynağı olarak

kullanılan elektron ışınının, 3500 °C mertebesinde yüksek sıcaklıklara ulaşabilmesi ile daha yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin de eklemeli imalatla üretilmesi mümkün olabilmektedir [13]. Çeşitli titanyum alaşımları, refrakter metaller ve çeşitli süper alaşımlar kullanılarak tasarlanmış ürünler, EBM yöntemi ile karmaşık geometrilerin elde edilebilmektedir. Hiemenz' in yaptığı çalışmada [13], bu yöntemle parçaların ayrı ayrı imal edilmesinden ziyade, karmaşık yapıların yekpare bir şekilde imalatının mümkün olduğu belirtilmektedir. Böylece, hem işçilik süresinin azaltılması hem de montaj süresinin ortadan kaldırılması ile maliyetlerde bir iyileştirmelerin yapılabildiği vurgulanmaktadır. Redwood çalışmasında [10], EBM yönteminde, SLS' ye göre daha az enerji sarf edildiği ve daha hızlı bir imalat yöntemi olduğu ifade etmekte olup, ayrıca SLS ye göre EBM yönteminde kullanılan toz partikül boyutunun daha kaba olduğu, bu yüzden daha fazla katman kalınlığı ile imalat gerçekleştiği ileri sürülmektedir. Bununla birlikte, EBM ile imal edilen parçalarda daha az kalıntı gerilme ve distorsiyon oluşurken, destek yapılarının kullanımına nadiren ihtiyaç duyulduğu, diğer bir yandan ise, imal edilen yüzey kalitesi bakımından EBM' in, SLM ve DMLS ürünlerinden daha düşük olduğu ortaya konulmaktadır [10].

LENS (Laser Engineered Net Shaping) ile eklemeli imalatla, tozun bir ağızdan (nozül) püskürtülerek ergitilmesi esasına dayanır. Bu metotta, tozun püskürtülmesi için nozul, tozun ergitilmesi için lazer kafası ve katmanın oksitlenmesini önlemek için de gaz borusuna sahip bir biriktirme kafası kullanılmaktadır. Nozuldan toz partikülleri ve gaz borusundan da koruyucu inert gaz püskürtülür ve püskürtülen tozlar lazer ile ergitilerek lokal eriyik havuzu oluşturulur. Ergiyik havuzun katılaşmasından sonra aynı imalat döngüsü ile katman katman üretim devam edilmektedir. Bu nedenle, bu yöntem "üflenmiş toz" eklemeli imalat da denilmektedir [11]. Yöntem oldukça hassas olup, 0,1 mm ile birkaç milimetre arasında değişen kalınlığa sahip bir malzeme katmanının otomatik olarak biriktirilmesi, kaplama malzemesinin ana malzemesine iyi bir kayma direnci ile tutunması ve düşük ısı girdisinin alt tabakaya nüfuz etmesi nedeniyle diğer kaynak tekniklerine benzemediği ileri sürülmektedir [12]. Diğer eklemeli imalat yöntemlerinde yaşanan kalıntı gerilmeler, birleşme yüzey çatlakları ve gözenek oluşumu gibi mukavemet azaltıcı sorunların, LENS yöntemi ile en aza indirilebildiği de anlaşılmaktadır [13]. Ayrıca, LENS' de, hammaddenin ikincil işlem tabii tutulmadan imalatın elverişli bir şekilde gerçekleştirilebildiği ve özellikle titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum ve inconel alaşımlar ile parça imalatının yapılabildiği belirtilmektedir [10].

EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing) yönteminde; istenen üç boyutlu metal parçaları, tel veya toz formundaki malzemenin elektron ışını ile ergitilip birleştirilmesiyle imal edilmektedir. Bu eklemeli imalat yöntemi, LENS 'e benzemekte olup, kullanılan elektron

ışınlarının, LENS' te kullanılan lazerlere göre daha etkili olduğu ifade edilmektedir [10]. Ayrıca, EBAM ile, 6 m'den daha uzun ve geniş parçaların düşük malzeme sarfiyatıyla yüksek kalitede üretilmesinden dolayı bu yöntemin diğer eklemeli imalat yöntemlerine göre önemli bir avantaja sahip olduğu ileri sürülmektedir [14].

3. TOZ ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE TOZLARIN KARAKTERİZASYONU (POWDER MANUFACTURING METHODS and CHARACTERISTICS OF POWDERS)

Toz üretim teknikleri mekanik, kimyasal, elektrolitik ve atomizasyon olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır. Bir araştırmaya göre, elektrolitik ve atomizasyon yöntemlerinin, fiziksel metot olarak nitelendirildiği görülmüştür [15]. Partikül esaslı parça imalatında, imal edilecek ürününden beklenen özellikler göz önüne alınarak, uygun toz malzemenin seçimi, seçilecek toz şekli, boyutu, akış karakteri, görünür yoğunluğu gibi özelliklerine bağlı olarak toz üretim yönteminin seçimi, imalat yönteminin seçimi (konvansiyonel TM yöntemleri ve eklemeli imalat) olarak yol izlenmektedir. Çizelge 1'de eklemeli imalatla kullanılan bazı tozların üretim yöntemleri görülmektedir.

Çizelge 1. Eklemeli imalatla kullanılan bazı tozların üretim yöntemleri (Manufacturing methods of some powders used in additive manufacturing) [16]

| Malzeme | Yöntem |
|-----------------------------------|---|
| Takım çelikleri | Su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, santrifüj yöntemi |
| Alüminyum | Vakum atomizasyonu |
| WC-Co | Mekanik öğütme |
| Kompozitler | Mekanik alaşımlama, Plazma atomizasyon |
| Bakır | Elektrolitik, su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, kimyasal yöntemler |
| Bakır, Pirinç ve Nikel alaşımları | Su atomizasyonu, gaz atomizasyonu |
| Altın | Elektrolitik, su atomizasyonu, kimyasal yöntemler |
| Çelik | Su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, santrifüj yöntemi |
| Gümüş | Su atomizasyonu, elektrolitik, kimyasal yöntemler |
| Titanyum | Kimyasal yöntemler, santrifüj yöntemi, gaz atomizasyonu |
| Süperalaşımlar | Mekanik alaşımlama, gaz atomizasyon, santrifüj yöntemi |

Gaz atomizasyonu ile, toz akıcılığı yüksek ve küresel tozlar imal edilebildiğinden dolayı, eklemeli imalatla kullanılacak tozların eldesi için bu yöntem daha çok tercih edilmektedir. Bununla birlikte, gaz atomizasyonu ile çeşitli alaşımların toz formlarının üretilmediği,

homojen tane boyut dağılımı sayesinde iyi bir toz yoğunluğuna sahip olduğu ve nispeten tozların tekrar kullanılabilir özellikte olduğu vurgulanmaktadır [17-21]. Ayrıca, eklemeli imalatta su atomizasyon yöntemi ile elde edilen tozların da kullanıldığı rapor edilmektedir. Ancak, su atomizasyonu ile elde edilen tozların genellikle düzensiz şekilli olmalarından dolayı partikül içi yoğunluklarının düşük olması sonucu toz akış kabiliyeti, gaz atomize küresel tozlara göre daha düşüktür. Eklemeli imalat yöntemlerinin kendine özgü çalışma prensiplerinden dolayı, seçilen toz partiküllerin dağılımı ve boyutlarında da farklılıkların olabileceği, örneğin, SLM' de 15 µm ila 63 µm arasında toz boyutu önerilirken, EBM için ise toz boyut dağılımının 45 µm ila 105 µm arasında olması gerektiği ifade edilmektedir [18-20]. Çizelge 2'de, eklemeli imalata uygun toz seçimi için, farklı imalat yöntemleri ile üretilen tozların karakterizasyonları ile birlikte avantaj ve dezavantajları verilmektedir.

Gaz atomizasyonu yönteminde; Şekil 3-a'da görülebileceği üzere, pota içerisindeki ergimiş metalin bir nozuldan şerit halinde akarken, uygun jetler ile azot ve argon gibi nötr gazların belli basınç ve hızla püskürtülerek ergimiş metalin çok küçük damlacıklar halinde atomize edilmesi ve soğuyup sertleşmesi ile katılaşmış partiküller elde edilmektedir. Bu yöntem,

parametrelerinin etkilediği ifade edilmekte ve sıvı metali atomize etmek için basınçlı akışkan olarak hava, azot, argon ve helyum gibi gazlar kullanılabilir [23].

Plazma döner elektrot (santrifüj atomizasyon) yönteminde; tozun elde edilmesi için, istenilen toz malzemesinin elektrot çubuk formu (ergiyen) ile ergimeyen tungsten elektrot arasında ark oluşturulur. Ergiyen elektrotun belli bir hızda döndürülmesiyle, elektrik arkı altında oluşan damlacıklar santrifüj etkisi ile savrulur ve parçalanır ve katılarak sistemin toz toplama tankına dolar.

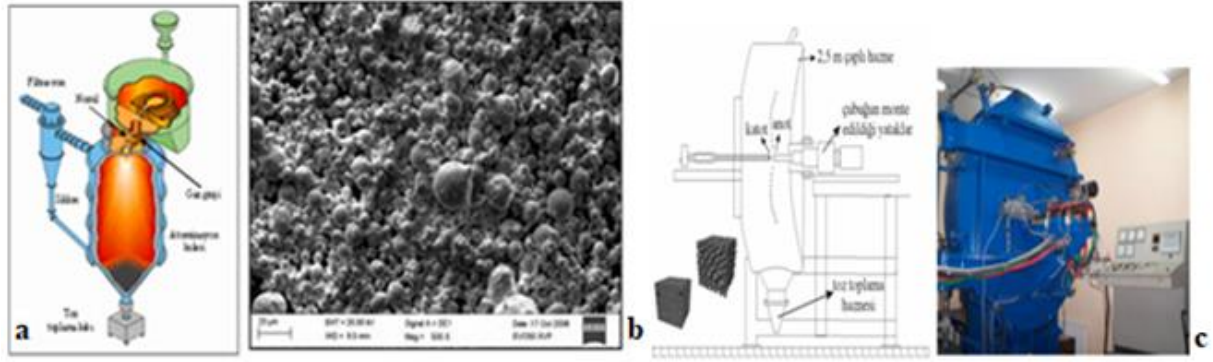
Oksidasyonu önlemek için toz toplama tankı belli bir vakum ile helyum, argon gibi asal gazlarla korunmakta [27] ve bu yöntemle kobalt, krom ve titanyum tozlarının elde edilebildiği anlaşılmaktadır. Şekil 3-c'de döner plazma elektrot toz üretim ünitesi verilmiştir. Eklemeli imalatla üretimi gerçekleştirilen metallerin özellikleri bazı araştırmacılar tarafından analiz edilmiş ve Spierings ve Levy' in yoğunluk çalışması [28]'nin, Kruth vd. ve Simchi' nin mikroyapı çalışmaları [29]; Spierings vd. [30] statik mekanik deneyleri üzerine yaptığı çalışmaları irdelenmiş olup, bu çalışmalarda parça yapım yönünün anizotropikliği etkilediği ve statik mekanik özelliklerin geleneksel dövme ile benzer aralıkta olduğu ileri sürülmektedir.

Çizelge 2. Eklemeli imalatta kullanılan bazı tozların özellikleri (Properties of some powders used in additive manufacturing) [21]

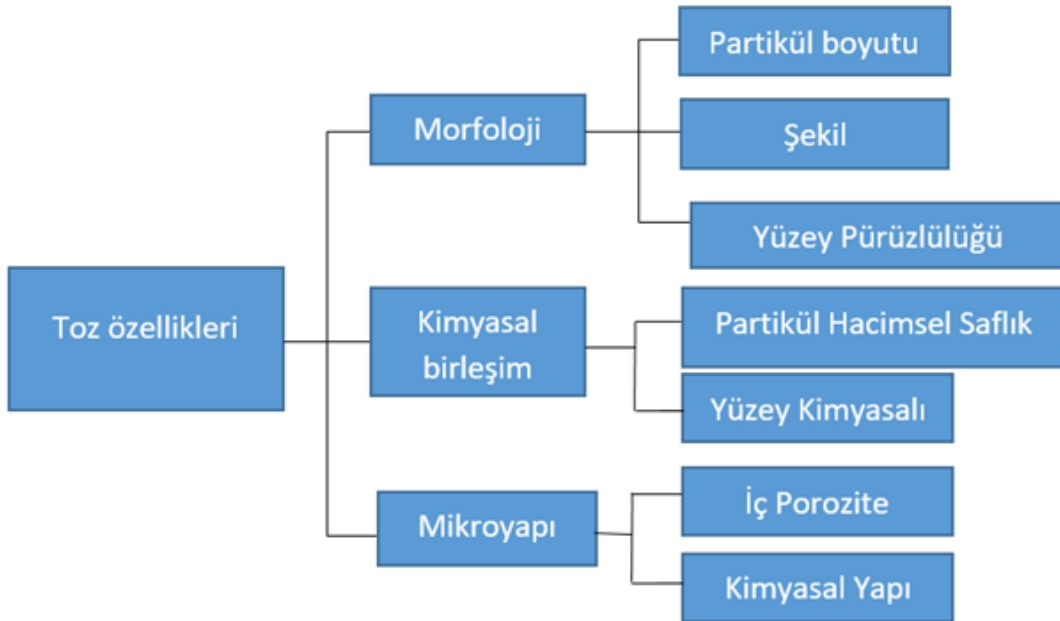
| Toz İmalat İşlemi Tablosu | | | |
|------------------------------|------------------------|---|--|
| İmalat İşlemi | Partikül boyut aralığı | Avantajları | Dezavantajları |
| Su atomizasyon | 0-500 µm | Yüksek üretim oranı, büyük partikül boyut aralığı, ingot şeklinde hammadde | Suyun taşınımı için ön işlemler, düzensiz partikül şekli, geniş partikül boyutu dağılımı |
| Gaz atomizasyon | 0-500 µm | İngot şeklinde hammadde, geniş aralıkta alaşımlar elde edilebilir, yüksek verim, büyük partikül boyutu aralığı, küresel partiküller | Dağılımda geniş parçacık boyutu |
| Plazma atomizasyon | 0-200 µm | Çok küresel partiküller | Hammadde tel veya toz halinde olmalıdır, yüksek fiyat |
| Plazma döner elektrot işlemi | 0-100 µm | Yüksek saflıkta tozlar, çok küresel partiküller | Düşük üretilebilirlik, yüksek fiyat |
| Santrifüj atomizasyon | 0-600 µm | Büyük partikül boyutu aralığı, dar parçacık boyutu | Son derece ince toz yapmada zorluk |
| Hibrit- dehibrit işlemi | 45-500 µm | Düşük fiyat | Düzensiz partikül şekli, kırılmalı bir hidrür oluşturan metallerle sınırlı |

eklemeli imalata uygun, ince ve küresel metal tozlarının üretilmesinde en yaygın kullanılan metot olup, özellikle çelik türleri, alüminyum alaşımları, değerli metaller vb. için yaygın olarak tercih edilmektedir [22]. Bu yöntemde toz karakterini, gazın cinsi, gaz basıncı, gaz ve sıvı metal akış debileri ile nozul geometrisi gibi üretim

Eklemeli imalat için tozun imalatı gerçekleştirildikten sonra, tozun morfolojisi, kimyasal bileşimi ve mikro yapısının karakterize edilmesi gerektiği bilinmekte olup toz karakterizasyonu ile ilgili özellikler Şekil 4'de verilmiştir.



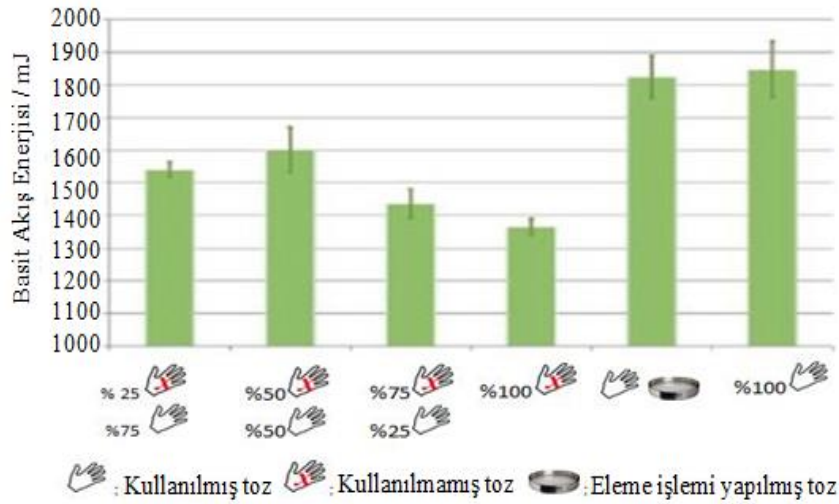
Şekil 3. a) Gaz atomizasyonun şekli (The shape of gas atomization) [24], b) Gaz atomizasyonu uygulanmış <20 µm 17-4PH tozunun SEM görüntüsü (SEM image of gas atomized <20 µm 17-4PH powder) [25], c) Döner plazma elektrot toz üretim ünitesi (Rotary plasma electrode powder production unit) [26]



Şekil 4. Toz özelliklerinin sınıflandırılması (Classification of powder properties) [31]

İlk olarak tozun morfolojik yapısı; tozun partikül boyutu, tozun şekli ve partikülün yüzey pürüzlülüğü ile tanımlanmaktadır. Bu belirlemelerin eklemeli imalat minimum parça katman kalınlığı ve hedeflenen yoğunluğu elde etmede önemli olduğu ve ayrıca partiküllerin akış ve paketlenme özelliklerini belirleyen önemli parametrelerdir. Yapılan bir çalışmada [29]; toz yataklı proseslerde tozun platforma serildikten sonra, ilgili parametrelerin toz yoğunluğunu etkilediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, üretilen eklemeli imalat ürünlerinde hedeflenen boyutsal ve yüzey kalitesini sağlamak adına toz özelliklerinin incelenmesi ve kontrol edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Hawkins [32], toz parçacıklarının morfolojisini karakterize eden birçok metodu kapsamlı bir şekilde gözden geçirmiş, imal edilen toz büyüklüğünün homojen olmasının platforma serim sırasında homojen tabaka kalınlığı elde edilmesine katkıda bulunduğunu ve tozun akışkanlığının da, tozların platformuna yayılmasında önemli bir role sahip olduğu

ileri sürmektedir. Ayrıca, partiküllerin üretimi sırasında çeşitli toz şekillerinin meydana gelebileceği (düzensiz, açısız, küresel, gözenekli, çubuksu gibi) ve düzensiz toz partiküllerinin diğer toz parçacıklarıyla temas alanlarının minimum olması nedeniyle, yalnızca küresel şekilli parçacıklar en yüksek akıcılığı sağlayabileceği de ifade edilmektedir. Böylece, küresel morfolojiye sahip tozların serilmesi sırasında, daha az taneler arası sürtünme kuvvetinin sağlanabileceği ve bu sayede iyi bir toz akış karakterinin elde edilebileceği vurgulanmaktadır. Herbir eklemeli imalat yöntemi, kendi gereksinimlerini karşılayacak özelliklere sahip tozun belirlenmesinde, tozların partikül boyutunun tayin edilmesi gerektiği de belirtilmektedir [32]. Diğer yandan Freeman [33], tozların akış karakteri üzerine yaptığı çalışmada, daha önce kullanılmış tozların akış yeteneğinin, kullanılmamış tozlara göre düşük olduğunu belirtmektedir ve Şekil 5’de daha önce kullanılan ve yeni tozların akış enerjileri verilmektedir.



Şekil 5. Tozların akış karakteri (Flow character of powders) [36]

Bu bağlamda Lyckfeldt [34]; eklemeli imalatla kullanılan tozların özelliklerini daha iyi ölçmek için bir çalışma yapmıştır. Yaptığı çalışmada, toz partiküllerinin benzer boyut dağılımlarına sahip olmasına rağmen, boyut dağılımındaki değişimlerin farklı toz akışına sebep olabileceğini ve eklemeli imalatla üretilen parçanın özelliklerini etkileyebileceğini rapor edilmektedir. Bu bağlamda, metal tozu karakterizasyonunu belirlemede Hall akış metodunun yaygın olarak kullanıldığı ve çevresel koşulların sonuçları etkilediği ileri sürülmektedir. Spierings vd. [30] yaptıkları çalışmada, 7.12 μm ila 24.17 μm , 19.84 μm ila 41.13 μm ve 15.26 μm ila 55.54 μm arasındaki partikül boyut dağılımına sahip üç farklı toz karakteri ile mekanik test numunelerini eklemeli imal etmişler ve yapılan testlerin sonucunda mekanik dayanım ve yüzey kalitesinin düşük partikül boyut aralığı ile arttığını deneysel olarak ortaya koymuşlardır. Hoegesa vd. [35] yaptıkları çalışmada ise, yüksek yoğunluklu parça imalatı için partikül boyutu ve küresellik özelliklerinin ön plana çıktığını ve yine yüksek toz akış karakterinin önemli olduğunu ve akışkanlığın da tozun şekline ve boyutuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Tozun kimyası; toz partikülünün temel bileşimini belirtir ve imalatı yapılan parçanın özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceği için bilinmesi gereken önemli bir özelliktir. Toz kimyası, toz yüzey kimyası ve partikül hacimsel saflık kimyası olmak üzere iki şekilde tanımlanmaktadır [29]. Toz yüzeyleri aynı malzemenin yığın halindeki yüzeylerinde de büyük ölçüde farklılık gösterebilir. Örneğin, paslanmaz çeliklerde yaklaşık 1-3 nm kalınlığında koruyucu Cr_2O_3 filmi oluşma eğiliminin olduğu ve bu oksit film tabakanın yüzey saflığını değiştirdiği bilinmektedir [37]. Ayrıca, toz imalat sürecinde, toz partikülünün iç yapısında beklenen kimyasal içerikten farklı impüriteler oluşabilir. Gerek toz yüzeyinde gerekse iç yapısında oluşan bu istenmeyen oksitler, eklemeli imalatla ürünün kalitesinde değişime neden olmaktadır. Bu yüzden, eklemeli imalatla kullanılan tozların kimyasal özelliklerini belirlemek için,

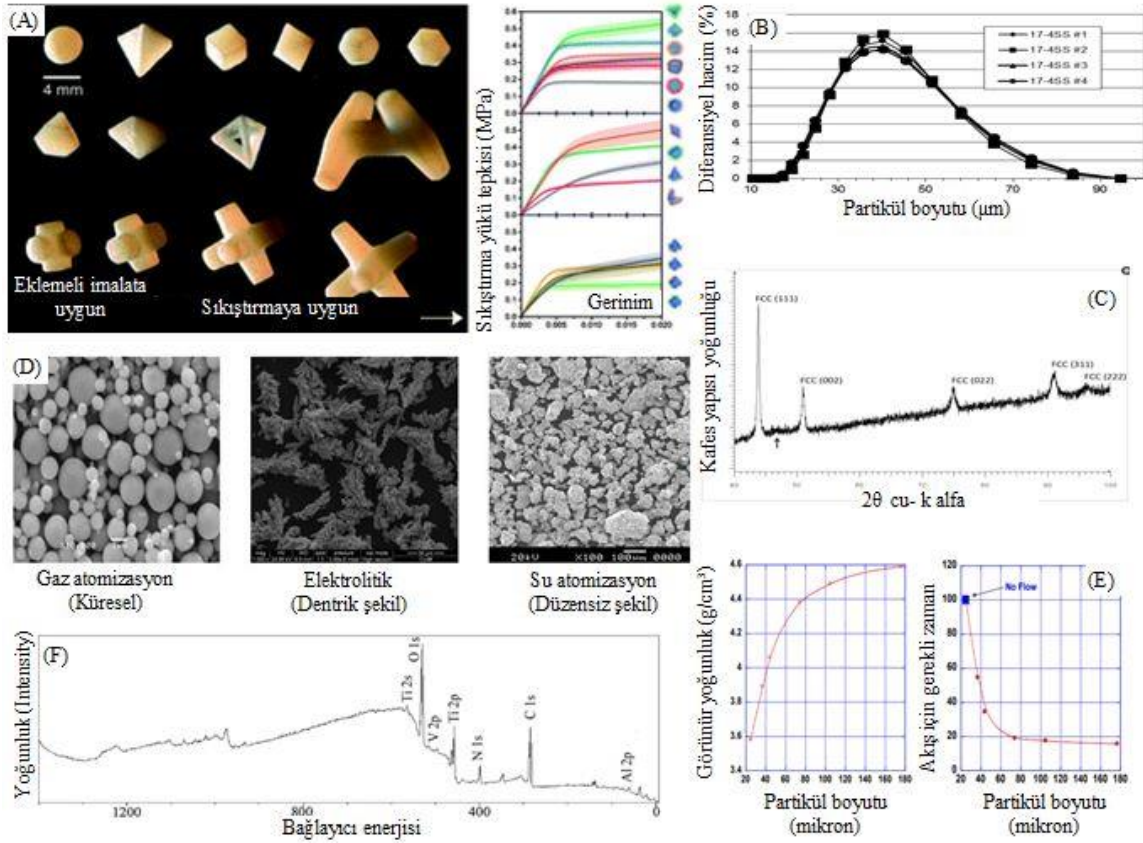
X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi, Auger Elektron Spektroskopisi, Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi, İndüktif Olarak Birleştirilmiş Plazma Optik Emisyon Spektroskopisi ve İnert Gaz Füzyonu gibi teknikler kullanılmaktadır. Simchi [29] yaptığı çalışmada, tozun ihtiva ettiği oksit miktarının elde edilen nihai ürün üzerindeki etkilerini incelemiş ve tozdaki oksijen içeriğindeki artışın SLS ile imal edilen parçaların gözenekliliğinde artışa neden olduğunu ve bunun ise istenmeyen bir durum olduğunu ifade etmektedir. Tang vd' de [38], tozun tekrar kullanımından dolayı, EBM ile Ti-6Al-4V ürününün oksijen içeriğinde artışa sebep olduğu, kullanılmış tozlarla eklemeli imalatın, artan oksijen miktarından dolayı tozun dörtten fazla kullanılamayacağı vurgulamaktadırlar. Ardila vd. [39]; geri dönüşümle elde edilmiş IN718 tozunu SLM ile imalatla kullanmışlar ve imal edilen numunelerde kimyasal içerik değişimini izlemek için Enerji Dağılımlı Röntgen Spektroskopisi (EDS) tekniğini kullanarak, kimyasal içeriğin her defasında değiştiğini ortaya koymuşlardır. Sonuç olarak, bu kimyasal kararsızlıktan dolayı, üretilen parçaların kırılma tokluğunda belirgin bir değişiklik gözlemlenmediğini ileri sürmektedirler.

Tozun mikroyapısı; toz partiküllerin gözenekliliği (porozite) ve kristal yapısı ile karakterize edilmektedir. Eklemeli imalatla kullanılacak tozun uygunluk araştırmasında, partikülün bünyesindeki gözenekliliğinin kristal yapı oluşumunu etkilemesinden dolayı, Metallografi, Taramalı Elektron Mikroskopu (TEM), X-ışını kırınımı (XRD), Termal Analiz (TA) yöntemleri ile tozun mikroyapısı incelenmektedir. Starr vd. yaptıkları çalışmada [40], azot ve argon atmosferinde atomize edilen iki farklı toz tipini XRD ile incelemişler ve azot ile atomize edilen tozun östenitik yapıya sahip olduğunu, argon ile atomize edilen tozun ise çoğunlukla martenzit yapıya sahip olduğunu deneysel olarak tayin etmişlerdir. Murr vd. [41], argon ve azot gazı ortamlarında, oluşan faz üzerine 17-4 PH'un muhtemel etkisini belirlemek için XRD yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarında, argon

gazının martenzitik yapıya dönüşümü sağladığını, diğer yandan azot gazının ise bir faz dönüşümüne sebep olduğu ile ilgili analiz sonucuna raslanıldığını rapor etmektedirler. Bu önemli farklılığın, eklemeli imalat sürecinde kullanılan gazın ısı iletkenliğindeki farklılıktan kaynaklanabileceği ileri sürülmektedir. En önemlisi de, partikül bünyesindeki gözenekliliğinin uzun mikroyapısını ve partikül yoğunluğunu değiştirdiğini ve dolayısıyla gözeneklilikten doğan düşük yoğunluğun dezavantaj olduğu vurgulanmaktadır. Maskery vd. [42], EBM ile üretilen AlSi10Mg alaşımındaki porozite oluşumunu incelemişler ve ısı işlem şartlarının mikroyapı ve sertliği değiştirdiğini, ancak gözenek şekli, miktarı ve boyutu üzerine ölçülebilir etkisinin olmadığını deneysel olarak belirlemişlerdir. Ayrıca, düz ve disk şekline sahip büyük gözeneklerin yapım yönüne dik yönde geliştiğini ortaya koymuşlardır. Toz karakterizasyonu ile ilgili yapılan bazı analiz çalışmaları Şekil 6' da verilmiştir [43-47].

yöntemleri ve imal edilen tozların karakterizasyonu ile ilgili bilgiler derlenmiştir. Özellikle, literatür araştırması sırasında eklemeli imalatın önemi, ülkemiz endüstrisinde hangi sektörlere girebileceği ve yaygınlaşması, ülkemizin polimer esaslı eklemeli imalatla nispeten mesafe kattığı ancak metal eklemeli imalat makinelerinin ve titanyum, inconel, paslanmaz çelik gibi tozların üretiminde dışa bağıllığın giderilmesi gerektiği ile ilgili sonuca ulaşılmıştır. Bu araştırma ile aşağıda sıralanan bazı sonuçlara da ulaşılmıştır:

- Toz partiküllerinin kullanıldığı temel eklemeli imalat yöntemlerinin, SLS, SLM, EBM, DMLS, LENS ve EBAM olduğu görülmüştür. Toz beslemeli/yataklı bu eklemeli imalat yöntemlerinin kendine özgü çalışma prensiplerinden dolayı, seçilen toz partiküllerin dağılımı ve boyutlarında farklılıkların olabileceği, örneğin, SLM' de 15 µm ile 63 µm arasında toz boyutu önerilirken, EBM için ise toz boyut



Şekil 6. Eklemeli imalata uygunluk araştırması,(Additive manufacturing conformity survey) a) Eklemeli imalata ve geleneksel presleme ile yüksek yoğunluklu TM parça imalatına uygun tozlar,(Powders suitable for the manufacture of high density TM parts by additive manufacturing and conventional pressing) b) Lazer difraksiyonu ile partikül boyut dağılımının tayini,(The particle size distribution with laser diffraction) c) XRD ile partikül kafes parametresinin araştırılması,(Investigation of the particle lattice parameter with XRD) d) SEM ile toz üretimine göre partikül oluşumlarının araştırılması,(Investigation of particle formation according to powder manufacturing method by SEM) e) Hall akış analizi ile akış karakterinin tayini,(Determination of flow character by Hall flow analysis) f) Toz partikülünde spektral analiz (Spectral analysis in powder particle) [43-47]

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Çok sayıda ulusal ve uluslararası çalışmanın irdelenerek hazırlandığı bu makalede, toz beslemeli/yataklı eklemeli imalat yöntemleri, bu yöntemlere toz sağlayan toz imalat

dağılımının 45 µm ile 105 µm arasında tozların tercih edildiği görülmüştür.

- Toz partiküllerin imalatında, su/gaz atomizasyon, plazma atomizasyon, plazma döner elektrot ve

santrifüj atomizasyon yöntemlerinin kullanıldığı; bunlardan gaz atomizasyon yönteminin eklemeli imalata toz sağlamada daha elverişli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, eklemeli imalat sonrası tozların geri dönüşümünün mümkün olduğu ve geri dönüştürülen tozların sınırlı tekrarlama ile kullanılabilirliği anlaşılmaktadır.

- Eklemeli imalat ürününün kalitesini etkileyen uygun toz seçimi ve karakterizasyonunda, tozun morfolojik yapısı, şekli, yüzey pürüzlülüğü, partikül yüzey ve hacimsel saflığı, iç porozitesi ve kimyasal içeriğinin analiz edilmesi gerektiği vurgulanmış olup, yüksek akış karakteri, küresel partikül şekli ve daha az iç porozite, yüksek kimyasal saflık, iyi partikül yüzey kalitesi ve düzgünlüğü göz önüne alınarak, bu özelliklere sahip partiküllerin toz sermede yüksek performanslarından dolayı seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Eklemeli imalat ile parça üretimi için partikül boyutu ve küresellik özelliklerinin ön plana çıktığı, toz akışkanlığının tozun şekline ve boyutuna bağlı olduğu görülmüştür. Şekil 6-e' ye göre, partikül boyutunun azalmasıyla toz akış hızının düştüğü, metal eklemeli imalata uygun olan toz boyutlarının, hall akış eğrisinin yatıklaşmaya başladığı 60-80 mikron aralığında olduğu anlaşılmaktadır.
- Bu bağlamda, eklemeli imalatta kullanılacak tozun uygunluk araştırmasında, partikülün bünyesindeki gözenekliliğinin parça yoğunluğu ve kristal yapısını etkilemesinden dolayı, imalata başlamadan önce seçilen tozların mikroyapısının TEM, XRD ve TA analizleri ile incelenmesi tavsiye edilmektedir. Ayrıca, tozların kimyasal karakterizasyonu için, X-ışını fotoelektron spektroskopisi, auger elektron spektroskopisi, enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi, indüktif olarak birleştirilmiş plazma optik emisyon spektroskopisi ve inert gaz füzyonu gibi tekniklerin kullanılabilirliği görülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] TTMD – Türk Toz Metalurjisi Derneği Online Yayını “Toz Metalurjisi”, Türk Toz Metalurjisi Derneği, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, www.turktoz.gazi.edu.tr, Ankara, 2003.
- [2] Öveçoğlu, M. L. “Toz Metalurjisi: Tarihsel Gelişim, Üretim Aşamaları ve Yeni Eğilimler”, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, **TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Yayını**, İstanbul, 449475, 1997.
- [3] Yalçın B., Ergene B., “Endüstriye Yeni Eğilim Olan 3-B Eklemeli İmalat Teknolojisi ve Metalurjisi”, **SDÜ. Uluslararası Teknolojik Araştırmalar Dergisi.**, 9,3: 65-88, (2017).
- [4] Lux Research Building the future: Assessing 3-D printing's opportunities and challenges. 2013. Boston: Lux Research Inc.
- <http://www.luxresearchinc.com/research>. Erişim tarihi: 20 Ocak 2018.
- [5] Katmanlı İmalat Teknolojileri ve Havacılık Uygulamaları, Sektör Değerlendirme Raporu, STM Mühendislik Teknoloji Danışmanlık, 1-22, Ankara, (2015). https://www.stm.com.tr/documents/file/Pdf/1.katmanli_imalat_teknolojileri_raporu.
- [6] Additive Manufacturing Research Group; About Additive Manufacturing. <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/> (2017)
- [7] Sunpreet S., Seeram R., Rupinder S., “Material Issues in Additive Manufacturing: A review”; **Journal of Manufacturing Processes**, 25:185-200, (2017).
- [8] Gibson I., Shi D., “Material Properties and Fabrication Parameters in Selective Laser Sintering Process”, **Rapid Prototyping Journal**, 3-4: 129-136, (1997).
- [9] Mercelis P., Kruth J.P., “Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting”, **Rapid Prototyping Journal**, 12-5: 254-265, (2006).
- [10] Redwood B., Additive manufacturing technologies overview, (2017). <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview>,
- [11] Strano, G. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting, **Journal of Materials Processing Technology**, 213-4: 589-597, (2013).
- [12] Metal AM; "Metal Katkı Üretim Süreçleri" başlıklı makale http://www.metal-am.com/introduction_to_metal-additive_manufacturing/processes.
- [13] Hiemenz J., “Electron beam melting”, **Advanced Materials & Processes**, 165-3: 45-46, (2007).
- [14] <http://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebam-advantages-of-wire-am-vs-powder-am/>
- [15] Upadhyaya, G.S. “Powder Metallurgy Technology”, **Cambridge International Science Publishing**, 1996.
- [16] Kurt A.O., 2004-2010 www.aokurt.sakarya.edu.tr/dersler/dersler.htm.
- [17] Toz Metalurjisi, Toz Üretim Teknikleri Ders Notları. http://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder_product.html. Erişim tarihi: 4 Ocak 2018.
- [18] Sadowski M, Ladani L, Brindley W, Romano J., “Optimizing quality of additively manufactured Inconel 718 using powder bed laser melting process”, **Additive Manufacturing**, 11:60–70, (2016).
- [19] Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C., “Additive manufacturing of metals”, **Acta Mater**, 117:371–92, (2016).
- [20] Helmer H., Bauerei A., Singer R.F., Körner C., “Grain structure evolution in Inconel 718 during selective electron beam melting”, **Mater Sci Eng A**; 668: 180-7, (2016).
- [21] Dawes B.J., Bowerman R., “Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain”, **Johnson Matthey Technol. Rev.**, 59:243–256, (2015). doi:http://dx.doi.org/10.1595/205651315X688686.
- [22] <http://eklemeliimalat.info.tr/3-eklemeli-imalat-icin-metal-tozlari/#3.1.2>. Erişim tarihi: 10 Ocak 2018.

- [23] Uslan, İ., Küçükarslan, S., “Kalay Tozu Üretimine Gaz Atomizasyonu Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25-1: 1-8, (2010).
- [24]http://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder_product.html . Erişim tarihi: 28 Aralık 2017.
- [25]<http://eklemeliimalat.info.tr/3-eklemeli-imalat-icin-metal-tozlari/#3.1>. Erişim tarihi: 12 Ocak 2018.
- [26] Yamanoglu R., Kocaeli Üniversitesi, Toz Üretim Yöntemleri Ders Notları, <http://docplayer.biz.tr/32188483-Toz-uretim-yontemleri-yrd-doc-dr-ridvan-yamanoglu.html>.
- [27] Evcin A., Afyon Kocatepe Üniversitesi; Toz Üretim Teknikleri Ders Notları, 2007 <http://www.kimmuh.com/evcin/toz/toz1a.pdf>.
- [28] Metal Eklemeli İmalat(M.E.I.) Teknolojileri, Destek Yapılar ve Hücreli Yapılar Ders Notları, Dumlupınar Üniversitesi Açık Ders Notları Sistemi. <http://www.adn.dpu.edu.tr/pluginfile.php>. Erişim tarihi: 20 Ocak 2018.
- [29] Simchi A., “The role of particle size on the laser sintering of iron powder”, *Metall. Mater. Trans. B.*, 35:937–948, 2004. doi:10.1007/s11663-004-0088-3.
- [30] Spierings A.B., Herres N., Levy G., “Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts”, *Rapid Prototyping J*:17-3:195–202, (2011).
- [31] Austin T. Sutton, Caitlin S. Kriewall , Ming C. Leu, Joseph W. Newkirk, “Powders For Additive Manufacturing Processes Characterization Techniques And Effects On Part Properties”, *Solid Freeform Fabrication, Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference Reviewed Paper*, 1004-1030, (2016).
- [32] A.E. Hawkins, “The Shape of Powder-Particle Outlines”, *Research Studies Press Ltd.*, England, (1993).
- [33] Freeman R. “Measuring the flow properties of consolidated, conditioned and aerated powders – A comparative study using a powder rheometer and a rotational shear cell”, *Powder Technology*, 174:25–33, (2007).
- [34] Lyckfeldt, O., *Euro PM 2013 Kongresi ve Sergisi Bildirileri Kitabı* , Cilt. 2, Sayfa: 225-230, Avrupa Toz Metalürjisi Derneği, Shrewsbury-İngiltere, (2013).
- [35] Hoegesa S., Zwirenb A., Schadeb C., “Additive manufacturing using water”, *Metal Powder Report*, 72, (2017).
- [36] Clayton, J. “Optimising metal powders for additive manufacturing”, *Metal Powder Report*, 69-5:14-17 (2014), [https://doi.org/10.1016/S0026-0657\(14\)70223-1](https://doi.org/10.1016/S0026-0657(14)70223-1)
- [37] S.J. Kerber, J. “*Tverberg, Stainless Steel, Adv. Mater. Process*”. 33–36, (2000).
- [38] Tang H.P., Qian M., Liu N., Zhang X.Z., Yang G.Y., Wang J., “Effect of Powder Reuse Times on Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V by Selective Electron Beam Melting”, *The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 67: 555–563, (2015). doi:10.1007/s11837-015-1300-4.
- [39] Ardila L.C., Garcíandia F., González-Díaz J.B., Álvarez P., Echeverría A., Petite M.M., Deffley R., Ochoa J., “Effect of IN718 Recycled Powder Reuse on Properties of Parts Manufactured by Means of Selective Laser Melting”, *Phys. Procedia.*, 56: 99–107, (2014). doi:10.1016/j.phpro.2014.08.152.
- [40] Starr T., Rafi K., Stucker B., Scherzer C., “Controlling phase composition in selective laser melted stainless steels”, *Proc. Solid Free. Fabr. Symp.*; 439–446, (2012).
- [41] Murr L.E., Martinez E., Hernandez J., Collins S., Amato K.N., Gaytan S.M., Shindo P.W., “Microstructures and properties of 17-4 PH stainless steel fabricated by selective laser melting”, *J. Mater. Res. Technol.*, 1: 167–17, (2012). doi:10.1016/S2238-7854(12)70029-7.
- [42] Maskery I, Aboulkhair N.T., Corfield M.R., Tuck C., Clare A.T., Leach R.K., Wildman R.D., Ashcroft I.A., Hague R.J.M., “Quantification and characterisation of porosity in selectively laser melted Al-Si10-Mg using X-ray computed tomography”, *Mater Charact.*, 111:193–204, (2016).
- [43] Heim K, Bernier F, Pelletier R, Lefebvre L., “High resolution pore size analysis in metallic powders by X-ray tomography”, *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 6: 45–52, (2016)
- [44] Athanassiadis A.G., Miskin M.Z., Paul K., Rodenberg N., Lee S.H., Merritt J., Brown E., Amend J., Lipsonb H., Jaeger H.M., “Particle shape effects on the stress response of granular packings”, *Soft Matter*, 10: 48–59, (2014).
- [45] Slotwinski J.A., Garboczi E.J., Stutzman P.E., Ferraris C.F., Watson S.S, Peltz M.A., “Characterization of Metal Powders Used for Additive Manufacturing”, *J Res Natl Inst Stand Technol.*; 119: 460–493, (2014).
- [46] GKN. Powder Metallurgy, (2018). [http://www.gkngroup.com/hoeganaes/media/Tech%20Library/SchadeAtomized%20Powders%20for%20Additive%20Manufacturing%20\(I\).pdf](http://www.gkngroup.com/hoeganaes/media/Tech%20Library/SchadeAtomized%20Powders%20for%20Additive%20Manufacturing%20(I).pdf)
- [47] Karlsson J., Snis A., Engqvist H., Lausmaa J., “Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti–6Al–4V powder”, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 213, Issue 12, 2013, Pages 2109–2118 (2017)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf cinsinin, yükün, kayma hızı ve mesafesinin abrasiv aşınmaya etkisi

Effect of fiber type, load, sliding speed and distance on abrasive wear of glass and carbon fiber reinforced composites

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet Emin DEMİR¹, Yahya Hışman ÇELİK², Erol KILIÇKAP³

ORCID¹: 0000-0001-9630-6378

ORCID²: 0000-0003-1753-7712

ORCID³: 0000-0001-5519-2917

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Demir M. E., Çelik Y. H. ve Kılıçkap E., “Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf cinsinin, yükün, kayma hızı ve mesafesinin abrasiv aşınmaya etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 811-817, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.429642

Cam ve Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerde Elyaf Cinsinin, Yükün, Kayma Hızı ve Mesafesinin Abrasiv Aşınmaya Etkisi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mehmet Emin DEMİR^{1*}, Yahya Hışman ÇELİK¹, Erol KILIÇKAP²

¹Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi Diyarbakır, Türkiye

(Geliş/Received : 01.06.2018 ; Kabul/Accepted : 28.09.2018)

ÖZ

Günümüzde, cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitler birçok mühendislik alanında geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu çalışmada, cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit çubukların kuru kayma koşullarındaki abrasiv aşınmaları gerçekleştirilmiştir. Pin on disk cihazında gerçekleştirilen deneylerde elyaf türünün, uygulanan yükün(5, 10 ve 15 N): kayma hızının(0,4; 0,6 ve 0,8 m/s) ve kayma mesafesinin(250, 500 ve 750 m) kompozitlerin tribolojik davranışlarına etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde cam elyaf takviyeli kompozitlerdeki sürtünme katsayısının karbon elyaf takviyeli kompozitlerdeki sürtünme katsayısından daha düşük çıktığı belirlenmiştir. Aşınmaya bağlı kütle kayıplarında, bütün koşullar için cam elyafta kütle kaybının daha az olduğu görülmüştür. Artan yük, kayma hızı ve mesafesinin kütle kaybını arttırdığı tespit edilmiştir. Karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde en yüksek kütle kayıpları, 15 N yük, 0,8 m/s kayma hızı ve 750 m kayma mesafesinin uygulandığı durumlarda gerçekleşmiştir.

Anahtar Kelimeler: Abrasiv aşınma, CETP kompozit, KETP kompozit.

Effect of Fiber Type, Load, Sliding Speed and Distance on Abrasive Wear of Glass and Carbon Fiber Reinforced Composites

ABSTRACT

Today, glass and carbon fiber reinforced composites have a wide range of applications in many engineering fields. In this work, abrasive wear in dry sliding conditions of glass and carbon fiber reinforced composite bars has been carried out. In the experiments, which conducted on the pin on disc device, the influence of the fiber type, the applied load(5, 10 and 15 N): the sliding speed(0.4, 0.6 and 0.8 m/s) and the sliding distance(250, 500 and 750 m) on the tribological behaviour of the composites was investigated. As a result of the studies, it was determined that the coefficient of friction of glass fiber reinforced composite was lower than the coefficient of friction of carbon fiber reinforced composite. In mass loss depending on wear, mass loss in the glass fiber was found to be less for all conditions. It has been found that increasing load, sliding speed and distance increased mass loss. The highest mass loss for glass and carbon fiber reinforced composites were achieved with the load of 15 N, the sliding speed of 0.8 m/s and the sliding distance of 750 m.

Keywords: Abrasive wear, GFRP composite, CFRP composite.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozitler, kimyasal olarak birbirinden farklı iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde bir araya gelerek oluşturduğu gelişmiş malzemelerdir. Kompozit malzemelerde bir veya daha fazla süreksiz faz, sürekli bir faz içerisine gömülür. Süreksiz faz, sürekli fazdan daha sert ve mukavemettir. Süreksiz faz takviye olarak, sürekli faz ise matris olarak isimlendirilir. Matris malzemesi metalik, polimerik veya seramik olabilir. Takviye fazı ise elyaf veya parçacık olabilir [1, 2].

Polimer bazlı kompozit malzemelerde; yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, hafiflik, üretim kolaylığı,

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : memin.demir@batman.edu.tr

düşük maliyet, iyi kimyasal kararlılık ve yüksek korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı epoksi, polyester, fenolik ve vinil ester gibi matris malzemeleri kullanılmaktadır [3]. Ancak bu matris malzemeleri nispeten düşük sertlik ve yüksek sıcaklıklarda sürünme eğilimi gösterdiğinden dolayı farklı tip elyaflarla takviye edilir [4]. Takviye edilen elyafların basma ve kesme mukavemeti ne kadar yüksek olursa bu liflere sahip polimer kompozitler o kadar yüksek yüklere dayanır ve aşınma kaybı düşer [3]. Bu yüzden, üstün özelliklere sahip cam ve karbon elyaflar polimer matrislerde takviye elemanı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimer matrisli cam ve/veya karbon elyaf takviyeli kompozitler farklı uygulamalarda tercih edilmektedir [5, 6]. Bu kompozit malzemeler iyi yağlama, üstün aşınma direnci ve metallere karşılaştırıldığında daha düşük sürtünme

katsayısı gibi özelliklerinden dolayı tribolojik uygulamalarda da kullanım alanı bulmaktadır [5, 7].

Hareketli iki parça arasında meydana gelen aşınma, sürtünme ve yağlama durumları triboloji olarak tanımlanmaktadır. Aşınma ve sürtünmenin olumsuz tarafı endüstride maliyetleri arttırması ve bunun sonucunda birçok firmanın kapanmasına neden olmasıdır. Bu nedenle malzemelerin tribolojik özelliklerinin incelenmesi faydalı olacaktır [8]. Tribolojik özelliklerin analizinde önemli parametreler normal kuvvet, yoğunluk, malzemenin cinsi, bağlı hareket, kimyasal direnç, sürtünme yüzeyi ve sıcaklık şeklinde sıralanabilir [9]. Cam ve karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerinin tribolojik özelliklerini belirlemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Pihitli [10], dokuma cam elyaf takviyeli epoksi ve polyester matrisli kompozitlerde matris malzemesinin, uygulanan yükün ve kayma hızının kuru aşınma davranışını incelemiştir. Epoksi matrisli kompozitlerin bütün yük ve hızlarda polyester matrisli kompozitlerden daha yüksek mukavemet ve minimum aşınma sergilediğini gözlemlemiştir. Artan yük ve hızlara bağlı olarak cam elyaf takviyeli kompozitlerin kütle kaybının arttığını tespit etmiştir. Zhou ve ark. [11], yaptıkları çalışmada, karbon elyaf takviyeli poliamid6/polifenilen sülfat(PA6/PPS) kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Karbon takviyeli PA6/PPS kompozitlerin(PA6/PPS-CF) ortalama sürtünme katsayı değerinin PA6/PPS malzemesinden daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Artan elyaf takviyesi ile kompozitlerin aşınma oranının arttığını tespit etmişlerdir. Sarkar ve ark. [12] cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerde farklı yük ve kayma hızlarının sürtünme ve aşınma davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bütün hızlarda yükün artmasıyla sürtünme katsayısının azaldığını ve bunun matrisin plastik deformasyonu sonucu meydana gelen ince yağ filminden kaynaklandığı gözlemlemiştir. Ayrıca artan kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısının arttığını, bunun da kayma diski ile kompozit arasında daha fazla yapışmadan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Suresha ve ark. [13], cam ve karbon kumaş takviyeli vinil ester kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Yük ve kayma hızı arttıkça sürtünme ve aşınma katsayısının arttığını ve bunun kumaş takviyesinin türüne ve interfazdaki sıcaklığa bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Karbon takviyeli vinil ester kompozitlerin daha üstün tribolojik özellikler sergilediğini tespit etmişlerdir. Aşınmış yüzeyde oluşan ince tabakanın, tribolojik özelliklerin iyileştirilmesinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. SEM görüntüleri ile inceledikleri aşınmış yüzeylerden, cam elyaf takviyeli vinil ester kompozitlerin karbon takviyeli vinil ester kompozitlere kıyasla daha fazla kırılmış elyaf oranına sahip olduğunu gözlemlemiştir. Siddhartha ve Gupta [1], ağırlıkça farklı yüzdelerde iki yönlü ve kırılmış E-cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin abrasiv aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Bu kompozitlerin aşınma özelliklerini, Taguchi deneysel

tasarım şeması ve varyans analizi(ANOVA) kullanarak başarılı bir şekilde analiz etmişlerdir. Bu kompozitlerde özgül aşınma oranı ile kopma mukavemeti arasında bir doğrusal ilişkinin olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca kırılmış cam elyaf takviyeli kompozitlerin abrasiv aşınma durumlarında iki yönlü cam elyaf takviyeli kompozitlerden daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Gao ve ark. [14] saf epoksi matris malzemesine grafit, SiO₂, karbon ve cam elyaf gibi takviye elemanları ilave ederek ürettikleri kompozitlerin sulu yağlama koşullarındaki sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Takviye elemanlarının epoksinin aşınma direncini arttırdığını gözlemlemiştir. Karışık ve sınır yağlama koşulları altında, karbon elyaf ve grafit ile takviye edilmiş epoksi kompozitlere SiO₂ nanoparçacıkları ilave etmenin sürtünmeyi ve aşınmayı oldukça azalttığını belirtmişlerdir. Conte ve Igartua [15], karbon, grafit ve cam elyaf takviyeli kompozitlerin sürtünme davranışını araştırmışlardır. Zhao ve ark. [16], kısa cam elyaf, katı yağlayıcı ve silika nanopartikül takviyeli epoksi kompozitlerin yağlamalı koşullarda tribolojik performansını incelemişlerdir. Epoksiye kısa cam elyaf ilavesinin epoksinin sürtünme ve aşınma direncini arttırdığını fakat katı yağlayıcı ve silika parçacıklarının ise aşınmaya katkısı olmadığını gözlemlemiştir. Cho ve Bhushan [17] silecek ve etiket yapımında kullanılan polimer malzemelerin aşınma ve sürtünme davranışında vernik boyasının, farklı kayma hızları ve yüklerin etkisini araştırmışlardır. Agrawal ve ark. [18] takviye elemanı olarak cam kullandıkları plastik matrisli kompozitlerde aşınma ve sürtünme davranışlarını yağlayıcı, kuru ve argon gazlı ortamda incelemişlerdir. Argon gazlı ortamda kütle kaybının, sürtünme katsayısının ve aşınma oranının en yüksek olduğunu, yağlayıcı ortamda ise bu değerlerin en düşük olduğunu belirlemişlerdir. Artan yüke bağlı olarak da kütle kaybı ve sürtünme katsayısının yükseldiğini tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada ise cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit çubukların kuru kayma şartları altında farklı yük, kayma hızı ve mesafesindeki abrasiv aşınma davranışları, aşınma kaybına bağlı olarak incelenmiştir.

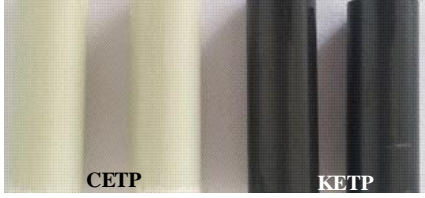
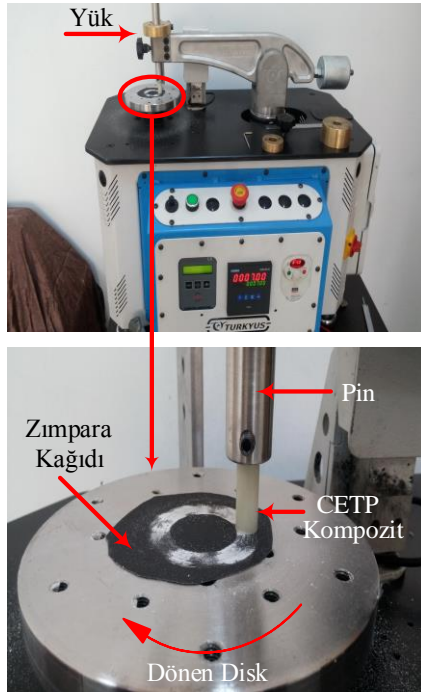
2. MATERYAL VE METOD(MATERIAL AND METHOD)

Deneysel çalışmalarda, ağırlıkça elyaf oranı % 75 ve reçine oranı % 25 olan vinil ester cam elyaf takviyeli plastik(CETP) ve karbon elyaf takviyeli plastik(KETP) kompozit çubuklar kullanılmıştır(Şekil 1). 10 mm çapa sahip olan bu çubuklar 30 mm uzunluğunda kesilerek deney numunesi elde edildi. Deney numunelerinin bazı özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

CETP ve KETP kompozit numunelerin abrasiv aşınma deneyleri Şekil 2’de gösterilen pin on disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Abrasiv aşındırıcı olarak 400 gridli SiC zımpara kâğıdı kullanılmıştır.

Çizelge 1. Elyaf takviyeli kompozit çubukların teknik özellikleri (Technical properties of fiber reinforced composite bars)

| Ürün | Elyaf | Çekme Dayanımı (MPa) | Basma Dayanımı (MPa) | Çekme Modülü (GPa) | Yoğunluk (g/cm ³) |
|------|-------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| CETP | E Cam | >1000 | >550 | >38 | >1,80 |
| KETP | TENAX STS40 | >2080 | >1450 | >145 | >1,51 |

**Şekil 1.** CETP ve KETP kompozit çubukların görüntüleri (Images of GFRP and CFRP composite bars)**Şekil 2.** Pin on disk deney düzeneği (Pin on disc experiment setup)

Şekil 2’de de görüldüğü gibi, pin on disk cihazının dönen diskine abrasiv aşındırıcı yapıştırılmıştır. Cihaz koluna ise numune bağlanmıştır. Çizelge 2’de verilen aşınma parametrelerinin kombinasyonu kullanılarak CETP ve KETP kompozit çubukların aşınma deneyleri yapılmıştır. Dolayısıyla her elyaf türü için 27 adet deney yapılmıştır.

Çizelge 2. Deney parametreleri ve seviyeleri (Experiment parameters and grades)

| Parametreler | Seviyeleri |
|-------------------|-----------------|
| Uygulanan yük(N) | 5, 10 ve 15 |
| Kayma hızı(m/s) | 0,4; 0,6 ve 0,8 |
| Kayma mesafesi(m) | 250, 500 ve 750 |

Aşındırma cihazında belirlenen hızlar takometre ile ayarlanmıştır. Deney sonunda kütle kayıplarını ölçmek için 0,1 mg hassasiyetli tartı (Radwag) kullanılmıştır. Her testin sonunda kullanılan zımpara yenilenecek bir sonraki teste geçilmiştir.

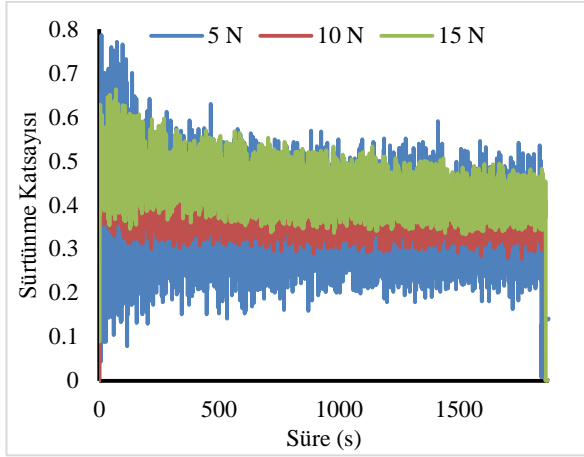
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Kompozit malzemelerin aşınmasında önemli olan faktörler uygulanan yük, kayma hızı, kayma mesafesi veya zamanı, yağlama durumu ve malzeme çiftinin özelliğidir. Aşınma deneyi cihazında bu faktörlerin tümüne müdahale edilebilmektedir. Deney esnasında ise bu parametreler bir bütün olarak düşünüldüğünde, önemli olan sürtünme esnasında açığa çıkan ısı, tribo yüzeyin oluşup oluşmadığı, sürtünme katsayısı değeri ve kütle kaybı veya plastik şekil değişimidir. CETP ve KETP kompozit çubukların abrasiv aşınma deneylerinde farklı yük, kayma hızı ve kayma mesafelerindeki sürtünme katsayıları ve kuvvetleri cihaz tarafından ölçülmüştür. Kayma zamanına bağlı olarak yükün, kayma hızının ve elyaf cinsinin sürtünme katsayısı üzerine etkileri Şekil 3’te gösterilmiştir.

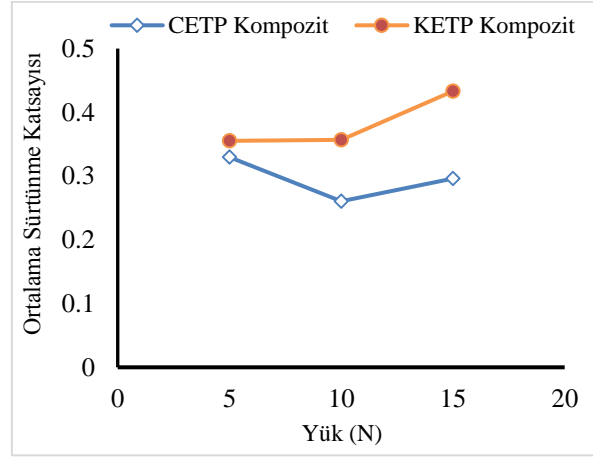
Şekil 3’te görüldüğü gibi abrasiv aşınma deneylerinde aşındırıcı zımparanın belirli gözenekte olması ve kompozit çubuk numunelerin alınlarından devamlı parça koparması sürtünme esnasında dalgalanmaların oluşmasına neden olmuştur. Başlangıçta sürtünme katsayısındaki dalgalanmalar oldukça fazla gözlemlenmiştir. Bu kompozit malzeme yüzeyinin aşındırıcıya alışma uyumu ile ilgilidir. Zamanla bu dalgalanmalar azalmıştır. Ayrıca yükün artması da dalgalanmaların azalmasına neden olmuştur. Çünkü yükün artması kompozit malzemenin aşındırıcıya daha iyi nüfus etmesini dolayısıyla aşınma esnasında oluşan titreşimin azalmasını sağlamıştır. Yükün aksine kayma hızındaki artışla birlikte aşınma esnasındaki titreşimler artmıştır. Bundan dolayı yüksek kayma hızında daha fazla dalgalanmalar görülmüştür.

Elyaf tipinin sürtünme katsayısındaki etkileri incelendiğinde ise KETP kompozitlerin CETP kompozitlerden daha fazla dalgalanma gösterdiği ve sürtünme katsayısının daha fazla olduğu görülmüştür.

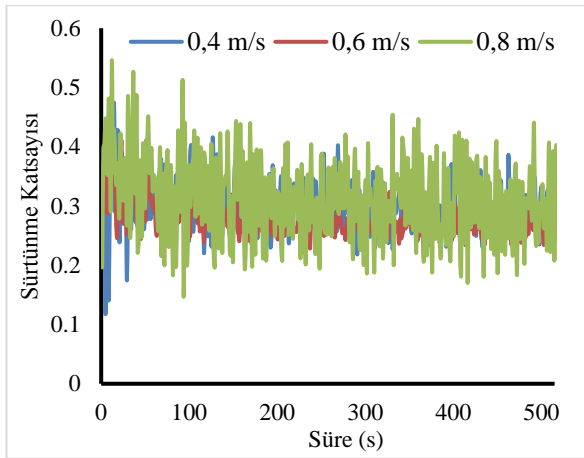
Aşınma deneylerinde, dalgalanmaların yaklaşık olarak $\pm 0,1$ değerinde değişmesi ve değerlerin bir birine yakın elde edilmesi nedeniyle ortalama sürtünme katsayılarının dikkate alınmasını ön plana çıkarmıştır. CETP ve KETP kompozitlerin yüke, kayma hızına ve kayma mesafesine bağlı ortalama sürtünme katsayıları Şekil 4’te verilmiştir.



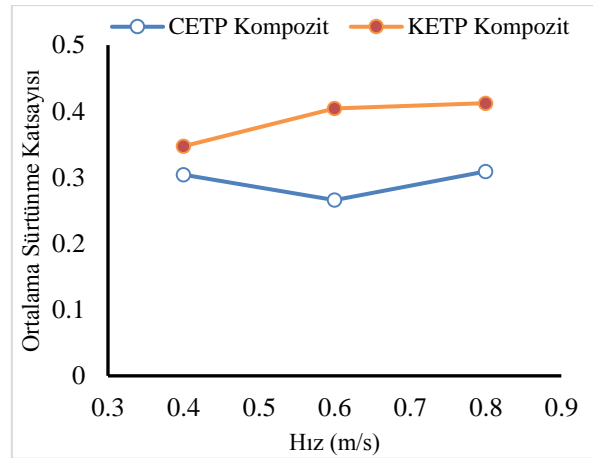
a) Malzeme: KETP Kompozit; Kayma Hızı: 0,4 m/s



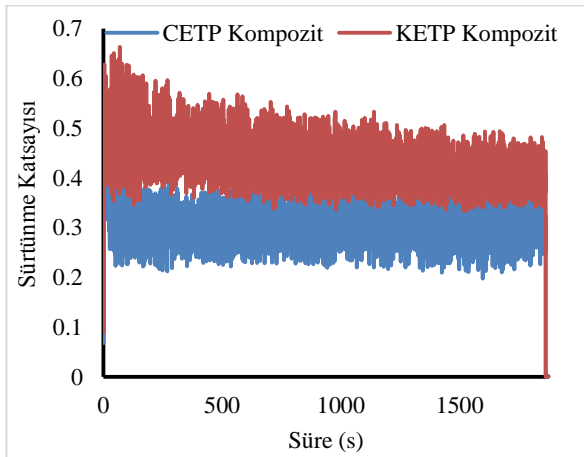
a) Kayma Hızı: 0,4 m/s; Kayma Mesafesi: 500 m



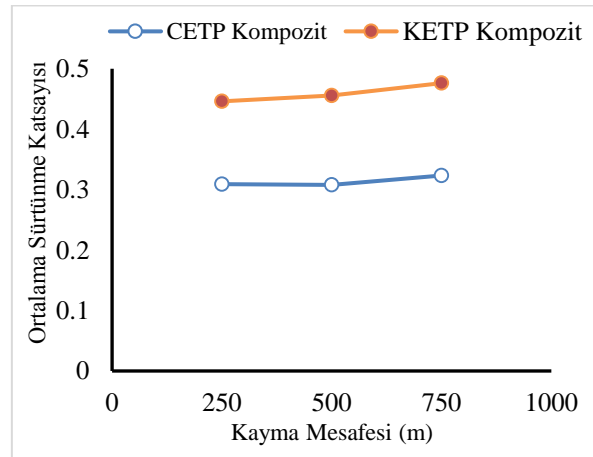
b) Malzeme: CETP Kompozit; Uygulanan Yük: 5 N



b) Uygulanan Yük: 5 N; Kayma Mesafesi: 750 m



c) Kayma Hızı: 0,4 m/s; Uygulanan Yük: 15 N



c) Kayma Hızı: 0,8 m/s, Uygulanan Yük 15 N

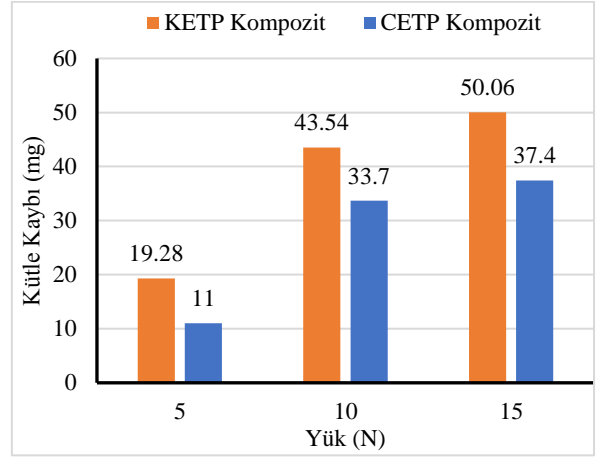
Şekil 3. Kompozit malzemelerin farklı aşınma parametrelerindeki kayma zamanına bağlı sürtünme katsayısı değişim grafiği (The friction coefficient variation depending on the sliding time in the different wear parameters of composite materials)

Şekil 4. Kompozit malzemelerin farklı aşınma parametrelerindeki kayma mesafesine bağlı ortalama sürtünme katsayısı değişimi (The friction coefficient variation depending on the sliding distance in the different wear parameters of composite materials)

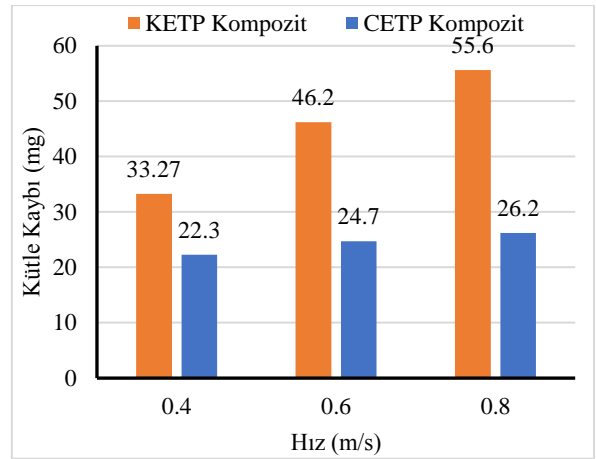
Şekil 4'te CETP ve KETP kompozit çubuklarda yükün 5 N'dan 10 N'a çıkması ortalama sürtünme katsayısını azaltmıştır. Yükün 10 N'dan 15 N'a çıkmasıyla ortalama sürtünme katsayısında artış görülmüştür. Polimer matrisli kompozitler viskoelastik özellik sergilediklerinden dolayı yük altında da deformasyona uğradıklarında viskoelastik davranırlar. Fakat kritik yük aşıldığı zaman sürtünme katsayısı artan yüzey polimer enerjisine bağlı olarak artmaya başlayacaktır [19]. Sumer ve ark. [20] da bu çalışmayla uyumlu olarak CETP kompozitlerin sürtünme katsayısının yüksek yüklerde arttığını tespit etmişlerdir. Şekil 4'te CETP kompozitlerin sürtünme katsayısının KETP kompozitlerden daha düşük olduğu da görülmektedir. Bu da cam elyafın kendinden yağlamalı özelliğinin olduğunu göstermektedir. CETP ve KETP kompozit çubuklardaki ortalama sürtünme katsayısındaki değişimin uygulanan yüke bağlı olarak lineer olmadığı ve bu farklı iki elyafa sahip kompozitlerde artan yük ile sürtünme katsayısındaki farkın giderek arttığı görülmektedir. Yapılan çalışmaların bazılarında artan kayma hızının, sürtünen yüzeyin aşındırıcı ile daha az temas etmesinden dolayı sürtünme katsayısını düşürdüğü de belirtilmiştir [21, 22]. Tevrüz [23] ve Unal ve ark.[19] yaptıkları çalışmada benzer şekilde artan hızla sürtünme katsayısının arttığını belirlemişlerdir. Unal ve ark. [19] artan hıza bağlı olarak oluşan ısıdan dolayı sürtünme katsayısının artmış olabileceğini ifade etmiştir. Ayrıca artan kayma mesafesinin CETK'lerin sürtünme katsayısını KETP kompozitlerden daha az etkilediği görülmekte olup her iki elyaf tipi için artışın lineer olduğu görülmüştür. Kayma mesafesinin artması, aşındırıcı ve kompozit malzemenin daha fazla temas etmesine, dolayısıyla sürtünme katsayısının artmasına neden olduğu düşünülebilir.

Sürtünme katsayısındaki farklılıklar temas halindeki yüzeyden kopan malzeme miktarını etkilemektedir. Elyaf cinsine, yüke, kayma hızına ve mesafesine bağlı kütle kayıpları Şekil 5'te verilmiştir.

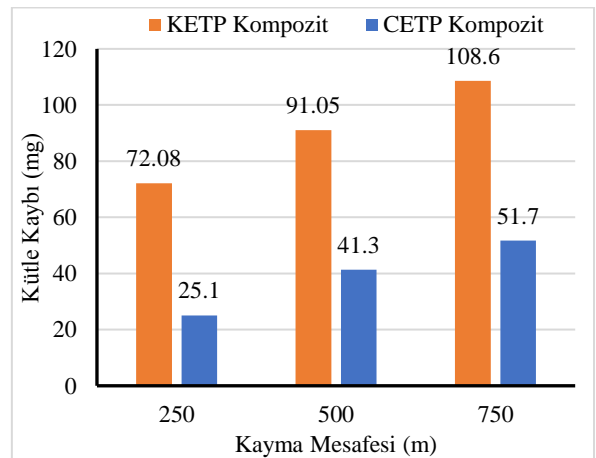
Yükün, kayma hızının ve mesafesinin artması hem CETP hem de KETP kompozit çubuklarda kütle kaybını arttırmıştır. Arun ve ark. [24] ve Kim ve ark. [25] artan yükün, Pıhtılı ve Tosun [2] ve Suresha ve ark. [6] ise artan kayma mesafesinin kütle kaybını arttırdığını belirtmişlerdir. Suresha ve Chandramohan'da [21] yaptıkları çalışmada artan kayma hızı ve yükün kütle kayıplarını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Yükün ve kayma mesafesinin artması sürtünen yüzeylerde temas basıncını arttırdığından dolayı abrasiv aşındırıcı kompozit malzemelerden daha fazla oranda talaş kaldırmıştır. Kayma hızının artması ise sürtünme esnasında malzemeler arasındaki sıcaklığı ve titreşimi arttırdığından malzeme kaybını arttırdığı düşünülmektedir. Artan yük, kayma hızı ve mesafesine bağlı kütle kayıplarına bakıldığında CETP kompozitlerin KETP kompozitlerden daha az aşındığı görülmektedir.



a) Kayma Hızı: 0,4 m/s; Kayma Mesafesi: 500 m



b) Uygulanan Yük:5 N; Kayma Mesafesi:750 m



c) Kayma Hızı: 0,8 m/s, Uygulanan Yük 15 N

Şekil 5. Kompozit malzemelerin farklı aşınma parametrelerindeki kayma mesafesine bağlı kütle kayıpları(Mass losses depending on the sliding distance in the different wear parameters of composite materials)

Karbonun aşınma direncinin daha iyi olduğu bilinmektedir. Ancak kütle kaybının CETP kompozitten daha fazla olmasının iki sebebi olduğu düşünülmektedir. Bunlardan birincisi CETP kompozitlerin aşınma deneylerinde yağlama özelliği gösterip daha az aşınmasıdır. İkincisi ise KETP kompozitten kopan parçacıkların zımpara üzerinde birikmesiyle kendi kendini aşındırarak daha fazla malzeme kaybına neden olmasıdır. Ayrıca sürtünme katsayıları ile aşınma değerleri karşılaştırıldığında düşük sürtünme katsayısı değerlerinde malzeme kaybının daha az olduğu görülmüştür.

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışma, CETP ve KETP kompozit çubukların tribolojik davranışlarını incelemek amacıyla yapılmıştır. Çalışmada elyaf türünün, kayma mesafesinin, kayma hızının ve uygulanan yükün kompozitlerin sürtünme katsayısı ve abrasiv aşınması üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Uygulanan bütün koşullar için CETP kompozit çubukların sürtünme katsayısının, KETP kompozit çubuklardan daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Uygulanan yükün, kayma mesafesinin ve hızın artması kompozitlerde sürtünme katsayısını arttıran bir etkiye sahiptir. Ancak kayma mesafesinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi uygulanan yük ve kayma hızından daha az olmuştur.
- Cihazdan elde edilen sürtünme katsayısı grafiklerine bakıldığında, 5 N yükteki dalgalanmaların daha fazla olduğu görülmüştür.
- KETP kompozitlerdeki kütle kaybının CETP kompozitlere kıyasla çok daha fazla olduğu görülmüştür.
- Uygulanan yükün, kayma mesafesinin ve hızın artması kütle kaybını arttırmıştır. CETP kompozitlerde artan yük ve hızlarda kütle kayıpları benzer çıkarken, kayma mesafesinin artmasının kütle kaybına etkisinin daha az olduğu tespit edilmiştir.
- Kütle kayıplarında etkisi araştırılan aşınma parametrelerinin (yük, kayma mesafesi ve hızı) CETP kompozitlere göre KETP kompozitleri daha baskın bir şekilde etkilediği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Siddhartha and Gupta K., Mechanical and abrasive wear characterization of bidirectional and chopped E-glass fiber reinforced composite materials, *Materials & Design* 35, 467–479, 2012.
- [2] Pihili H., and Tosun N., Effect of load and speed on the wear behaviour of woven glass fabrics and aramid fibre-reinforced composites, *Wear* 252(11–12): 979–984, 2002.
- [3] Sathishkumar T. P., Satheeshkumar S., and Naveen J., Glass fiber-reinforced polymer composites-A review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 33(13): 1258–1275, 2014.
- [4] Davim J. P., and Cardoso R., Effect of the reinforcement(carbon or glass fibres) on friction and wear behaviour of the PEEK against steel surface at long dry sliding, *Wear* 266(7–8): 795–799, 2009.
- [5] Suresha B., Chandramohan G., Samapthkumaran P., Seetharamu S., and Vynatheya S., Friction and wear characteristics of carbon-epoxy and glass-epoxy woven roving fiber composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 25(7): 771–782, 2006.
- [6] Suresha B., and Kumar K. N. S., Investigations on mechanical and two-body abrasive wear behaviour of glass/carbon fabric reinforced vinyl ester composites, *Materials & Design* 30(6): 2056–2060, 2009.
- [7] Srinath G., and Gnanamoorthy R., Effect of short fibre reinforcement on the friction and wear behaviour of nylon 66, *Applied Composite Materials* 12(6): 369–383, 2005.
- [8] Parikh H. H., and Gohil P. P., Tribology of fiber reinforced polymer matrix composites-A review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 34(16): 1340–1346, 2015.
- [9] Chowdhury M. A., Nuruzzaman D. M., Roy B. K., Samad S., Sarker R., and Rezwana A. H. M., Experimental investigation of friction coefficient and wear rate of composite materials sliding against smooth and rough mild steel counterfaces, *Tribology in Industry* 35(4): 286–296, 2013.
- [10] Pihili H., An experimental investigation of wear of glass fibre-epoxy resin and glass fibre-polyester resin composite materials, *European Polymer Journal* 45(1): 149–154, 2009.
- [11] Zhou S., Zhang Q., Wu C. and Huang J., Effect of carbon fiber reinforcement on the mechanical and tribological properties of polyamide6/polyphenylene sulfide composites, *Materials & Design* 44, 493–499, 2013.
- [12] Sarkar P., Modak N., and Sahoo P., Effect of normal load and velocity on continuous sliding friction and wear behavior of woven glass fiber reinforced epoxy composite, *Materials Today: Proceeding* 4(2): 3082–3092, 2017.
- [13] Suresha B., Kumar K. S., Seetharamu S., and Kumaran P. S., Friction and dry sliding wear behavior of carbon and glass fabric reinforced vinyl ester composites, *Tribology International* 43, 602–609, 2010.
- [14] Gao C. P., Guo G. F., Zhao F. Y., Wang T. M., Jim B., Wezel B., Zhang G., and Wang Q. H., Tribological behaviors of epoxy composites under water lubrication conditions, *Tribology International* 95: 333–341, 2016.
- [15] Conte M., and Igartua A., Study of PTFE composites tribological behavior, *Wear* 296(1–2): 568–574, 2012.
- [16] Zhao F., Li G., Österle W., Häusler I., Zhang G., Wang T., and Wang Q., Tribological investigations of glass fiber reinforced epoxy composites under oil lubrication conditions, *Tribology International* 103, 208–217, 2016.
- [17] Cho D. H., and Bhushan B., Friction and wear of various polymer pairs used for label and wiper in labelling machine, *Tribology International* 98, 10–19, 2016.
- [18] Agrawal S., Singh K. K., and Sarkar P. K., A comparative study of wear and friction characteristics of glass fibre

- reinforced epoxy resin, sliding under dry, oil-lubricated and inert gas environments, **Tribology International** 96: 217-224, 2016.
- [19] Unal H., Mimaroglu A., Kadioglu U., and Ekiz H., Sliding friction and wear behaviour of polytetrafluoroethylene and its composites under dry conditions, **Materials and Design** 25: 239–245, 2004.
- [20] Sumer M., Unal H., and Mimaroglu A., Evaluation of tribological behaviour of PEEK and glass fibre reinforced PEEK composite under dry sliding and water lubricated conditions, **Wear** 265: 1061–1065, 2008.
- [21] Suresha B., Chandramohan G., Siddaramaiah, Samapthkumaran P., and Seetharamu S., Three-body abrasive wear behaviour of carbon and glass fiber reinforced epoxy composites, **Materials Sciences and Engineering** 443: 285–291, 2007.
- [22] Chen B., Wang J., and Yan F., Tribology International Comparative investigation on the tribological behaviors of CF/PEEK composites under sea water lubrication, **Tribology International** 52: 170–177, 2012.
- [23] Tevruz T., Tribological behaviours of carbon filled polytetrafluoroethylene(PTFE) dry journal bearings, **Wear**, 221(1): 61–68, 1998.
- [24] Arun A., and Singh K. K., Friction and wear behaviour of glass fibre reinforced polymer composite(GFRP) under dry and oil lubricated environmental conditions, **Materials Today: Proceeding** 4: 7285–7292, 2017.
- [25] Kim S. S., Shin M. W., and Jang H., Tribological properties of short glass fiber reinforced polyamide 12 sliding on medium carbon steel, **Wear** 274–275: 34–42, 2012.



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Comparison of the numerical models for the temperature distributions of non-premixed swirling methane flame

Comparison of the numerical models for the temperature distributions of non-premixed swirling methane flame

Yazar(lar) (Author(s)): Güven TUNÇ¹, İlker YILMAZ²

ORCID¹: 0000-0001-7038-8168

ORCID²: 0000-0001-7956-7752

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Tunç G., Yılmaz I., “Comparison of the numerical models for the temperature distributions of non-premixed swirling methane flame”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 819-826, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.448529

Comparison of the Numerical Models for the Temperature Distributions of Non-premixed Swirling Methane Flame

Araştırma Makalesi / Research Article

Güven TUNÇ^{1*}, İlker YILMAZ²

¹Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Aeronautical Engineering, Erciyes University, Turkey

² Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Airframe and Powerplant, Erciyes University, Turkey

(Geliş/Received : 27.07.2018 ; Kabul/Accepted : 04.10.2018)

ABSTRACT

This study aimed to investigate the numerical modelling parameters that are in good agreement with experimental data for the temperature distribution of a non-premixed swirling methane flame. All numerical calculations have been performed with FLUENT, a computational fluid dynamics code. P-1 radiation model has been chosen for all numerical calculations. In addition, the swirl number has been taken 0.4 value to validate the results with respect to reference experimental data. All comparisons have been performed in axial and radial temperature distributions according to experimental data. Firstly, the number of swirls has been defined as a user-defined function. Thus, the effect of defining user-defined functions has been examined in the swirl number. Secondly, the model constant (A) of the eddy dissipation combustion model has been investigated to determine suitable value. After that, the eddy dissipation and PDF mixture fraction combustion models have been compared with each other. Finally, the k-ε standard, realizable and RNG models have been analyzed to determine the proper turbulence model. The results showed that to define the swirl number as a user-defined function in the comparison tests has not been an important effect to obtain good agreement with the experimental temperature distribution data. It has been found that the value of one for the Eddy dissipation model constant is suitable for this model. It has also been found that the experimental results in both combustion models give approximate results, but the PDF model is particularly better at axial temperature distribution. Moreover, it has been seen that the k-ε realizable turbulence model is more suitable for this model.

Keywords: User-defined function, numerical modelling, methane, combustion.

1. INTRODUCTION

Nowadays, the energy demand is ever-increasing with the rise of industrialization and technology. Fossil fuels still play an important role in satisfying this need. Fossil fuels generally come into prominence with their content of the carbon and hydrocarbon. Natural gas is one of the fossil fuels and contains methane, which is a hydrocarbon in its structure. In this regard, methane is an important source of fossil energy. However, the widespread use of fossil fuels is a serious problem for humankind because the resulting emissions are causing global warming. Numerous studies have been conducted to solve this problem. One of these researches is the reduction of emissions by burning fossil fuels in the most efficient way. Reduction of emissions is possible with the complete combustion. For this reason, the swirling of the air inside the combustion chamber is important in terms of achieving the complete combustion. Due to the swirling flow, no unburnt particles remain in the combustion chamber. Swirl flow is an important effect providing flame stability and flame propagation. There are a number of studies that have studied these effects experimentally and numerically. In the literature, many studies have been performed about non-premixed swirling methane flame, up until now. Wilkes et al. have been studied on the measurement of axial and radial temperature distributions in Harwell furnace which is an

axisymmetric natural gas-fired swirling furnace [1]. Song et al. have been conducted a numerical study which is about fluid flow and gaseous radiation heat transfer characteristics of the natural gas-fired furnace. It has been shown that the importance of calculations of spectral and narrow-band statistical model enables simplicity for calculations [2]. Chen has been studied the nitrogen dioxide emissions of CH₄ and its some mixtures. It has been reported that NO₂/NO_x ratio is differently affected CH₄ fuel from H₂. Moreover, it has been concluded that this ratio is increasing with decreasing NO concentration and adiabatic flame temperature [3]. Ma et al. have been performed numerical analysis of the turbulent diffusion flame in a cylindrical combustor by using eddy dissipation and flamelet combustion models. They have been found that the flamelet model has good agreement with experimental data and the eddy dissipation model is useless in the near burner region [4]. Morvan et al. have been numerically investigated a methane/air radiating turbulent diffusion flame. They have been used eddy dissipation concept as a combustion model and both standard k-ε and renormalization group theory (RNG) models for turbulence and finally, they used P1 approximation for the radiation transfer and soot formation. They have reported that the 20-25 percent of released combustion heat comes from the flame. In addition, they have been released that small Froude numbers cause unsteady and unsymmetrical flame behaviour but at the higher Froude numbers, steady and symmetrical behaviour comes back

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : guventunc@erciyes.edu.tr

[5]. Keramida et al. have been examined that discrete transfer radiation model for a swirling natural gas diffusion flame in the axisymmetric furnace. They have emphasized that the importance of the radiation effects in a furnace and the success of the discrete transfer model for accurate calculations [6]. İlbas et al. have been studied the laminar burning velocities of the hydrogen, air, methane mixtures, experimentally. They have used different equivalence ratios to measure the temperatures. They have reported that to adding hydrogen in the mixture cause the increase of burning velocity. They have also asserted that 30 % hydrogen and 70 % methane mixture is the most appropriate choice [7]. Park et al. have been investigated the flame structure and emission characteristics of the methane-air diffusion flame when the adding H₂ and H₂O. They have shown that the maximum flame temperature increases due to the effect of H₂O and when the H₂O added, CO₂ emission increases while the emission of CO reduces [8]. Khelil et al. have been studied the emission characteristics of high swirling non-premixed natural gas diffusion flame, numerically. They have used PDF and Reynolds stress model for calculation. They have concluded that the results of these models agree with experimental results [9]. Hu et al. have been analyzed the NO emission and velocity of the premixed methane, hydrogen and air flames. They have pointed out that the increase of hydrogen fraction causes the increment in laminar burning velocity. They have also shown that in the rich flames hydrogen, addition causes the decrease of NO emission but in the stoichiometric flames, it does not affect NO emission [10]. Lui et al. have been investigated the premixed methane-air combustion. They have performed the calculations numerically in the porous media using the user-defined function. They have demonstrated that the change in the temperature and velocity is significant at the near wall and interface of the porous media [11]. Bhadraiah et al have been investigated the effect of chemical kinetic mechanisms in laminar methane-oxygen diffusion flames. It has been demonstrated that the 2-steps mechanism is the more suitable solution for oxygen-rich methane flames [12]. Saqr et al. have been studied that the NO_x and soot formation of the CH₄-air flames under the free stream turbulence. They have shown that the increase in free steam turbulence causes an important reduction in NO formation [13]. Khanafer et al. have been computed NO_x and fluid dynamics parameters in swirl burners. They have concluded that the increasing effect of swirl causes the reduction in CO and unburned particles [14]. Monaghan et al. have been analyzed the formation of pollutant in methane flame using the CFD-CRN method. They have stated that the method successfully predicts velocity, mixture fraction, temperature, CO and NO mass fractions according to experimental data [15]. İlbas et al. have been studied the hydrogen addition effects on methane, experimentally. It is concluded that the addition of hydrogen is positively affecting CO emission and the efficiency of combustion [16]. Yılmaz has been studied the effect of swirling flow

a natural gas flame. The results have revealed that the swirling affects the flame temperature and the gas concentrations as well as radial and axial velocities [17]. Abdul-Sater et al have been examined radiation modelling in oxy-methane and diffusion flames using the user-defined function [18]. Yılmaz et al. have been investigated different turbulence and radiation models in propane-hydrogen diffusion flames. It is concluded that the results of numerical models commonly agree with experimental data and the increase of hydrogen concentration causes the decrease in CO₂ emission and an increase in H₂O concentration [19]. İlbas et al. have been studied the effect of swirl flow in hydrogen-containing fuels. They have suggested that the change in swirling flow causes the high NO_x regions [20]. Yılmaz et al. have been analyzed hydrogen-air flames under the different turbulence models. They have shown that the k-ε model gives the best result according to experimental data [21]. Karyeyen et al. have been performed that the experimental study on low calorific syngas mixtures in a new type burner. They have pointed out that the transform of CO to CO₂ is highly affected by hydrogen supply [22]. İlbas et al. have been determined the characteristics of low calorific syngas under the different turbulator angles. The results have demonstrated that the increase in turbulator angle expediting the syngas reaction [23]. Rashwan has been determined the effect of swirl flow and oxidizer composition in non-premixed methane flames. It is concluded that the increase in swirl flow reduces the thermal NO_x [24].

This study is purposed to determine more suitable numerical model parameters to obtain good agreement with experimental results. All of the numerical calculations of modellings have been performed using the ANSYS FLUENT [25]. Thereafter, the obtained results which from numerical calculations have been used for comparisons of models. Initially, the effect of the define swirl number as a user-defined function has been investigated. A swirling flow has been created with the tangential velocity as an internal boundary condition that is created by using the user-defined function. In the next section, the eddy dissipation model constant (A) has been determined to evaluate the effect of numerical calculations. The comparison of eddy dissipation and PDF mixture fraction combustion models have been performed after these calculations. Finally, k-ε turbulence models have been compared to obtain the experimental results.

2. DETAILS OF MODELLING

2.1. Details of the Combustor and Boundary Conditions

In order to validate our numerical calculations with experimental data, the model of the combustion chamber has been taken from Wilkes et al. [1]. It consists of one outlet and two inlets for air and fuel, separately. Thus, the model is non-premixed, axisymmetric and 2-D. The

dimensions of the combustion chamber are shown in Figure-1. The parameters of the boundary and operation conditions for the combustion chamber has been shown in Table-1. As shown in Table-1 as an important parameter, swirling flow is only effective on the air stream. Swirl flow provides that the flame spreads over a larger area so unburnt particles burn in this way. Swirl number (S) is the ratio between the tangential momentum flux and axial momentum flux [17]. It also defined as Eq.-1 where the swirl generator hub diameter and the outer diameter is d_h and d , respectively. In addition, β is the exit angle of the swirl generator [26].

$$S = \frac{2}{3} \left(\frac{1 - \left(\frac{d_h}{d}\right)^3}{1 - \left(\frac{d_h}{d}\right)^2} \right) \tan \beta \quad (1)$$

The exit angle of the swirl generator has been obtained from Eq.-1. This angle has been used with the axial velocity of air (U_x) in Eq-2 to obtain the tangential velocity component of the air (U_θ).

$$U_\theta = U_x \times \tan \beta \quad (2)$$

The user-defined function that obtained from Ref.26 has been used to calculate the Eq-2. The value of the swirl angle has been calculated using Eq.-2 to obtain the swirl number is 0.4. Finally, the calculated tangential velocity value and other necessary values have been applied to the tangential momentum equation as a boundary condition. The tangential momentum equation can be seen in Eq.-3 for the 2-D swirling flow in the cylindrical coordinates [26].

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho U_\theta)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho U_\theta U_x)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho U_\theta U_r)}{\partial r} \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r\mu \frac{\partial U_\theta}{\partial x} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \mu \frac{\partial \left(\frac{U_\theta}{r}\right)}{\partial r} \right] \\ - \rho \frac{U_\theta U_r}{r} \end{aligned} \quad (3)$$

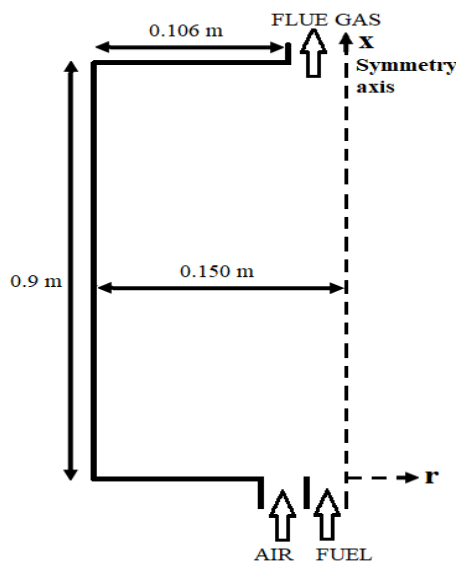


Figure 1. The geometric model of the combustor

Table 1. Boundary and operation conditions

| Boundary Conditions | Fuel | Air | Operation Conditions | |
|---|--------|------|----------------------|--------------|
| CH ₄ (mass fraction) | 1.0 | - | Temperature (K) | 295 |
| N ₂ (mass fraction) | - | 0.77 | Pressure | 1 Atm |
| O ₂ (mass fraction) | - | 0.23 | Reynolds number | 10909 (fuel) |
| Axial Velocity (m/s) | 15.0 | 12.8 | Thermal Power | 60 kW |
| Radial Velocity (m/s) | - | - | Equivalence ratio | 0.83 |
| Turbulent kinetic energy (m ² /s ²) | 2.26 | 1.63 | Swirl Number | 0.4 (air) |
| Turbulence dissipation rate (m ² /s ²) | 1131.8 | 692 | | |

2.2. Details of the Mathematical Models

In this work, two combustion models have been chosen for calculations and comparisons. One of them is the Eddy Dissipation model and the other is PDF mixture fraction model. In the Eddy dissipation model, it is assumed that the chemical reactions in the turbulent flow occur very quickly and the reaction rate is determined in this way. The reaction rate could be calculated using Eq.-4 considering to the minimum value [26].

$$R_f = A\rho \frac{\varepsilon}{K} \min \left(\bar{Y}_f, \frac{1}{v} \bar{Y}_o, B \frac{1}{1+v} \bar{Y}_p \right) \quad (4)$$

In Eq.-4, the local mass fractions of fuel, oxidizer, products are \bar{Y}_f , \bar{Y}_o , \bar{Y}_p and v is the oxidizer to fuel stoichiometric mass ratio. In addition, A and B are constant that equals to 4.0 and 0.5 respectively.

Another model that has been used in this study is the Mixture Fraction/PDF Model. Instead of solving the transport equation for each chemical species, the PDF model solves the transport equation for a single conserved scalar (the mixture fraction). The general form of the transport equation is seen Eq.-5 [23].

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial x} + \text{div}(\rho\phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (5)$$

Where Γ is the transport coefficient for dependent variables (ϕ) and the source term (S_ϕ). The equation of

the local mixture fraction (f) could be seen in Eq.-6 where the mass fraction of the fuel is m_f and the mass fraction of oxidant is m_o [23].

$$f = \frac{m_f}{m_f + m_o} \quad (6)$$

Mixture fraction distribution provides the approximate thermochemical state of the fluid. One could be obtaining the mean mixture fraction (\bar{f}) and its variance (\bar{f}'^2) from Eq.-7 and 8.

$$\frac{\partial(\rho\bar{f})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \bar{f})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \right) + S_m \quad (7)$$

Where S_m is the source term.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\bar{f}'^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \bar{f}'^2)}{\partial x_i} \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{f}'^2 \right) + C_g \mu_t \left(\frac{\partial \bar{f}'^2}{\partial x_i} \right)^2 \\ - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \bar{f}'^2 \end{aligned} \quad (8)$$

In Eq.-8, C_g , C_d and σ_t are the constants.

The time-averaged values of the mixture fraction and its variance are related to probability density function (PDF). The PDF mixture model supplies the knowledge about the formation of the intermediate species not using the detailed chemical kinetics [26].

k- ε models have been selected for the modelling the turbulent flow to obtain good agreement with experimental data. Standard, realizable and RNG k- ε models have been compared to each other. These models are well-known and mostly used models for turbulent flows. In this calculations, Eddy dissipation model has been used for combustion modelling.

The radiation heat transfer is another important phenomenon in the combustion process. In this study, P-1 radiation model has been chosen for the modelling radiative heat transfer. P-1 model is the simpler case of the P-N radiation model and it's very commonly used in combustion modelling. This model accounts for the radiation heat transfer between gas and particulates.

The SIMPLE algorithm has been chosen for Pressure-velocity coupling. In addition, second order upwind has been selected for all interpolation in the spatial discretization except pressure. Second order spatial discretization has been chosen for pressure interpolation. The convergence criteria have been determined below 10^{-6} for all scaled residuals. Numerical solutions have been performed using ANSYS FLUENT that uses the finite volume method to solve governing equations.

3. GRID INDEPENDENCY

In numerical studies, the solution depends on the mesh size. As the mesh increases, the solution can converge after some point. In order to investigate this effect, four different mesh size has been selected for in this study. These are mesh sizes are 14350, 24600, 63250, 121200.

Comparisons of these mesh sizes have been performed on the axial temperature distribution of the combustion chamber. This comparison could be seen in Figure-2. Experimental results that were taken by Wilkes et. al. [1] have been used to determine the mesh size that has good agreement values. According to Figure-2, 63250 and 121200 mesh sizes are more compatible with experimental data. In addition, there is no significant difference between the results of 63250 mesh size and 121200 mesh size. Therefore, 63250 mesh size has been found to be sufficient for numerical solutions, and all numerical analyzes were performed on this mesh size, in this study. The numerical calculation time has been decreased in this way.

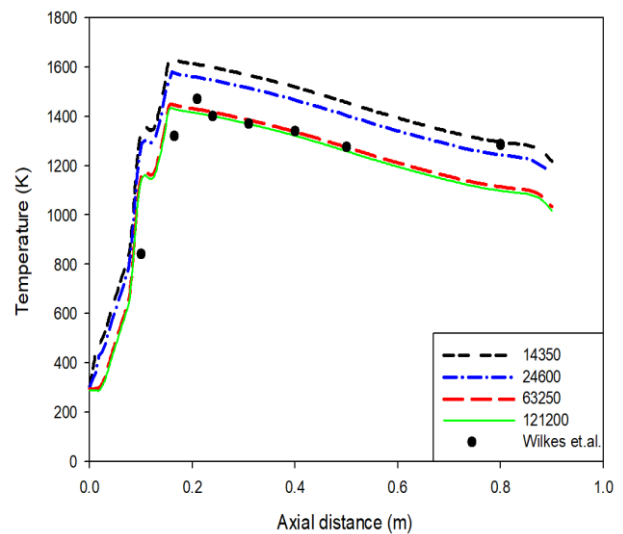


Figure 2. The comparison of grid independency at axial temperature distribution

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

4.1. The Effect of User Defined Function

One of the main purposes of this study is to determine the effect of user-defined function in the relation between experimental results and numerical results. For this purpose, a user-defined function has been used to define the swirling velocity and integrated into the boundary conditions of the swirling velocity in the computational fluid dynamics code. According to the conclusions from the next section, the mixture ratio (A) has been taken as 1 in Eddy-dissipation concept. The effect of user-defined function on the predicted axial and radial temperature profiles is presented in Figure 3 and Figure 4. When Figure 3 and Figure 4 are examined together in detail, it has been demonstrated that there is no considerable change for the temperature profiles of the methane flame except the flame region when the programmed user-defined function is used. In particular, however, the predicted radial temperature profiles under conditions in which user-defined function has been used are more coherent with the measured data in terms of trends and values. Therefore, it has been determined that the

programmed user-defined function is used for boundary conditions of swirling velocity.

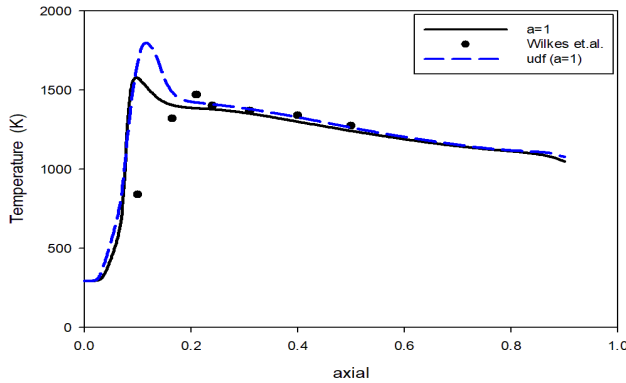


Figure 3. The comparison between Eddy dissipation models using user-defined function (UDF) and not using UDF at axial temperature distribution

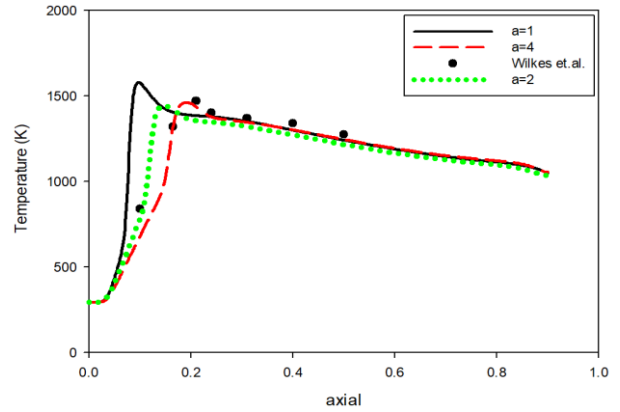


Figure 5. The effect of the change of the model constant (A) in the Eddy dissipation combustion model on the axial temperature distribution

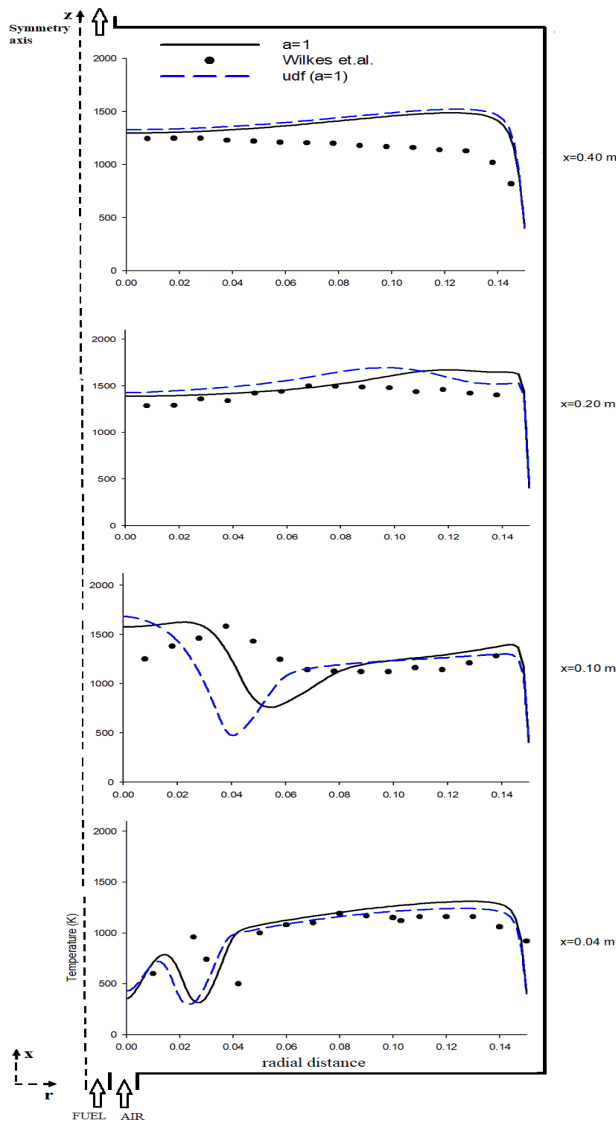


Figure 4. The comparison between Eddy dissipation models using user-defined function (UDF) and not using UDF at radial temperature distributions

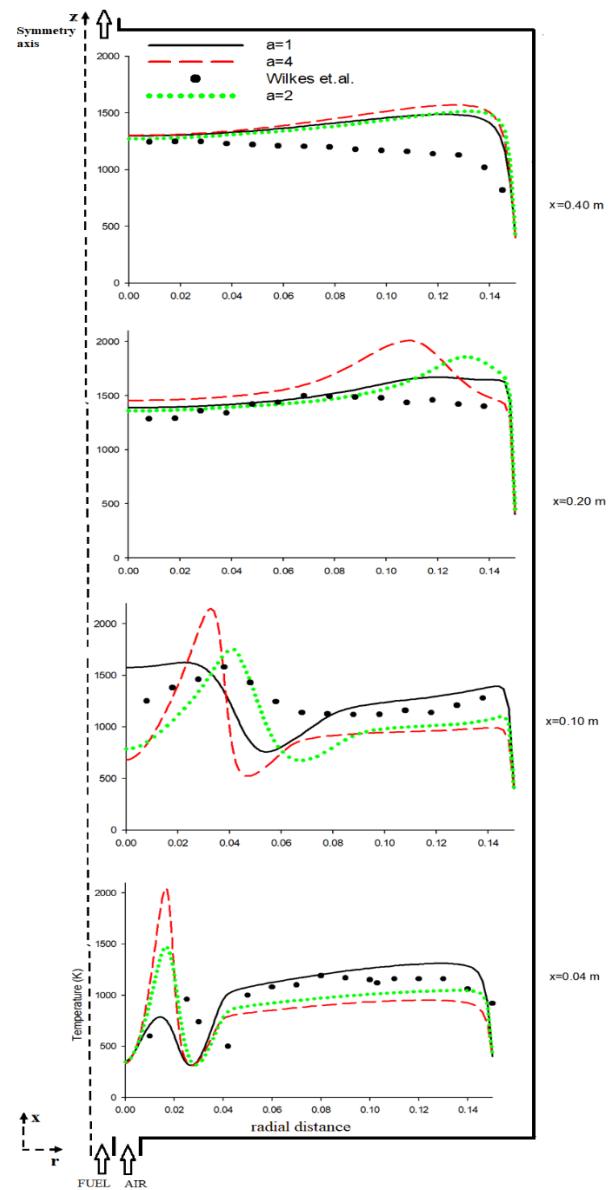


Figure 6. The effect of the change of the model constant (A) in the Eddy dissipation combustion model on the radial temperature distribution

4.2. The Effect of Model Constant (A) in Eddy Dissipation Model

In this part of the present study, the effect of the model constant (A) on the predicted temperature profiles is presented. The model constant (A) has been taken as 4 (the default value), 2 and 1. The predicted and the radial temperature distributions for different cases are given in Figure 5 and Figure 6. As can be seen in Figure 5, it can firstly be said that the predicted axial temperature profiles for A=4 are in good agreement with the measured data. However, predicted axial temperature profiles for the other values of A are not satisfactorily good agreement with the measured data. In particular, the predicted temperature values are not good in the flame region. This conclusion can be explained that the model constant (A) is directly related to the reaction rate. Therefore, it is revealed that the reaction rate is reduced as the model constant (A) is decreased. In other words, the predicted temperature values are consistency after the middle of the combustor when the model constant (A) is reduced. This conclusion can be supported when Figure 6 is examined in detail. It can be readily said that the predicted radial temperature profiles for case of A=1 are in good agreement with the measured data. In particular, after the middle of the combustor, it can be seen that there is a consistency between the predicted radial temperature profiles for case of A=1 and the measured data. It can be consequently concluded that there is a considerable consistency between predictions and measurements due to decreasing of the reaction rate when the model constant (A) is reduced in the modellings.

4.3. The Comparison of Combustion Models

Two combustion models, Eddy dissipation and PDF mixture fraction models, has been selected to compare the numerical results. Both combustion models have standard k-ε turbulence model and P1 radiation model. Moreover, user-defined function has been used for swirl velocity in the calculations of both models. The comparisons can be seen in Fig.7 and 8. Figure-7 shows the axial temperature distribution throughout the combustion chamber. In the Fig.-7, Eddy dissipation model has been shown worse results compared to the PDF model, especially at the initial axial distances. The reason of this problem is the structure of Eddy dissipation model. Eddy model is the known as "mixed is burned" and this is causing more combustion products emergence than expected. Therefore, this situation has been causing more high-temperature lines than experimental data in the graph. Both models have good agreement with experimental results at the after 0.2 m axial distance. In addition, it can be seen that PDF mixture model could be predicted finely the experimental values throughout all of the axial distance. In the Figure-8, it can be seen radial temperature distribution of the combustion models. The Eddy dissipation model have been given better results than PDF model at the radial temperature distribution at

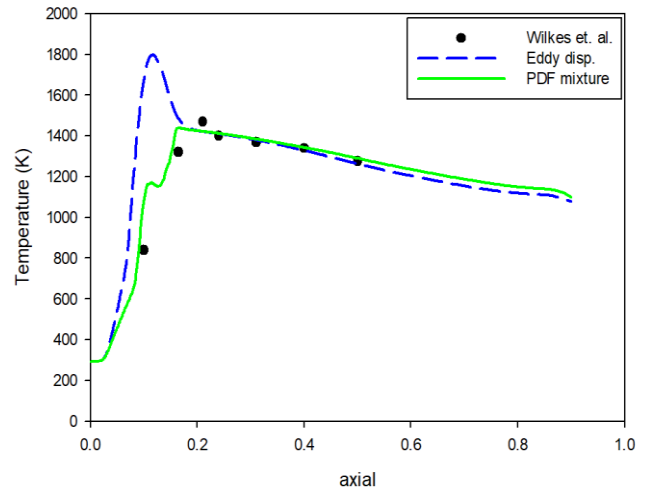


Figure 7. The comparison between Eddy dissipation models and PDF mixture model at axial temperature distribution

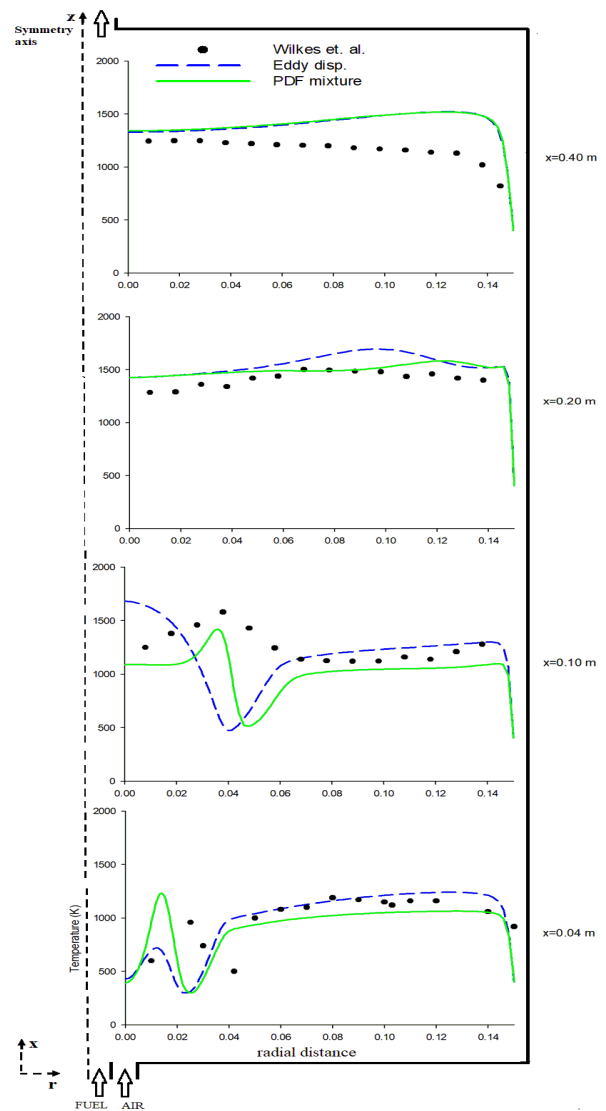


Figure 8. The comparison between Eddy dissipation models and PDF mixture model at radial temperature distribution

0.04 m, the closest distance to the start of the combustion chamber. Both combustion model gives better results at between 0.06 and 0.14m radial distance where the axial distances are 0.04m and 0.10m, respectively. However, both models have not been reached appropriate results in near the flame zone. The PDF model is more approximate than Eddy model in the near the swirl flow. On the other hand, eddy model can give better results than PDF mixture at the near of the fuel and air entrance region. At $x=0.20$ m, there is no difference between both models, except the distance between 0.06 and 0.12m radial distances. Because Eddy models more predict the formation of combustion product and cause to obtain high-temperature values. The eddy and PDF models have the same trends and approximate values in the middle of the combustion chambers.

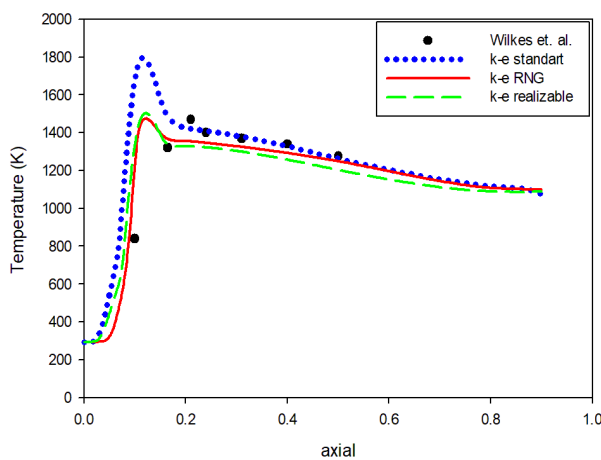


Figure 9. The comparison of $k-\epsilon$ turbulence models at axial temperature distribution using Eddy dissipation combustion model

4.4. The Comparison of Turbulence Models

The comparison of turbulence models can be seen in Fig.9 and 10. Figure-9 shows the axial temperature distribution, at this figure, the $k-\epsilon$ RNG model has good agreement with experimental data. Also, the $k-\epsilon$ realizable model has approximate prediction compared to the $k-\epsilon$ standard model. The $k-\epsilon$ RNG model contains the additional rate of strain term in the ϵ equation. In addition, it involves the turbulent viscosity modification to obtain the best numerical results in swirling flows. Thus, our numerical results showed that $k-\epsilon$ RNG model provides a good approximation to experimental data throughout the axial temperature distribution. The $k-\epsilon$ realizable model has some improvements with respect to other the $k-\epsilon$ models. It is also known that this model is suitable for strong rotation, vortices. While investigating the radial temperature distribution, it is observed that the $k-\epsilon$ realizable and RNG models give the better results than the standard model in the close to the flame region. Especially, as we approach the walls of the combustion chamber, it appears that the $k-\epsilon$ realizable model gives results that are closer to experimental values. This may be due to the fact that the $k-\epsilon$ realizable model contains a different turbulent viscosity formulation than the other models. All the models have given the same results

towards the exit of the combustion chamber in the radial direction.

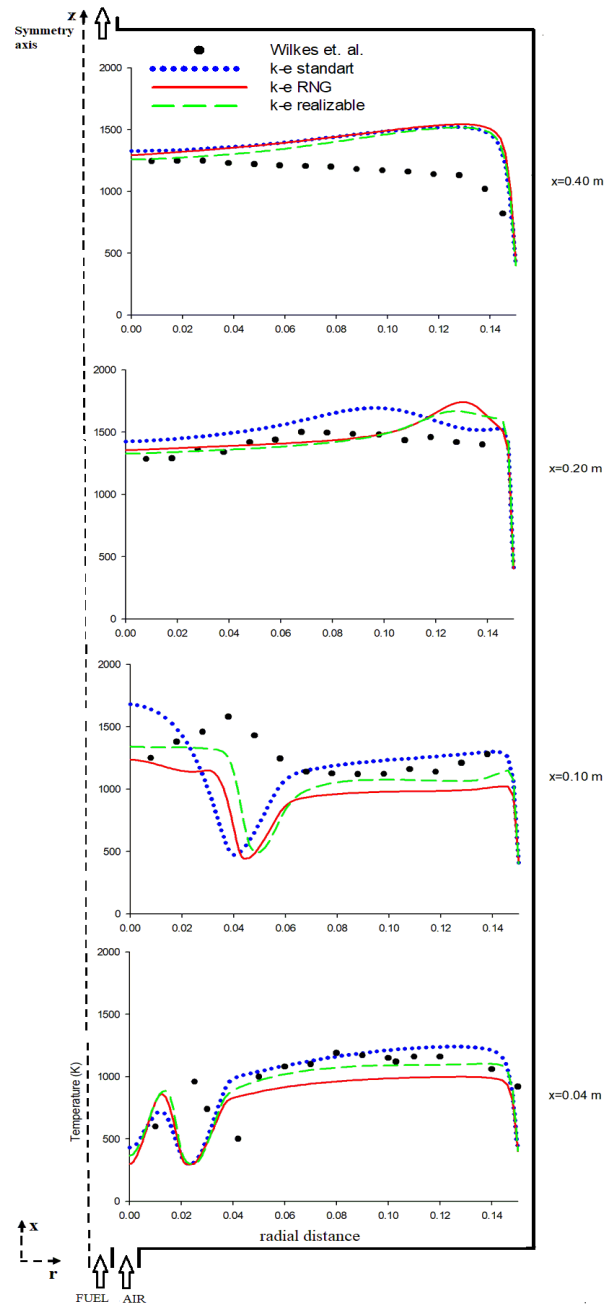


Figure 10. The comparison of $k-\epsilon$ turbulence models at radial temperature distributions using Eddy dissipation combustion model

5. CONCLUSIONS

The results have been showed that the definition of swirl velocity using the UDF may not significantly affect the results. However, it is seen that the using of UDF has a little bit of contribution to the coherence between the experimental data and numerical results. It is clearly seen that the determination of model constant (A) in the Eddy dissipation model calculations have a significant effect on the obtain more accurate temperature distribution. According to the results, it is seen that taking this value

as one and closer values of one is an important effect in obtaining experimental results. As the combustion models are considered, it has been seen that, in the flame zone, the PDF mixture model gives good agreement with experimental results at the axial temperature distribution. On the radial direction, it has been obtained that both of the models give appropriate results especially, in the close regions of the wall of the combustion chamber. As for considering the turbulence models, the closest results to the experimental data have been obtained using k- ϵ RNG and realizable models. Particularly, one can observe from the results that the k- ϵ realizable model is more suitable to obtain experimental results than other models.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Wilkes, N. S., Guilbert, P. W., Shepherd, C. M., and Simcox, S., "The application of Harwell-Flow 3D to combustion models", *Atomic Energy Authority Report*, Harwell, UK, Paper No. AERE-R13508, (1989).
- [2] Song, G., Børge, T., Holen, J., and Magnussen, B. F. "Simulation of fluid flow and gaseous radiation heat transfer in a natural gas-fired furnace", *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 7(2-3): 169-180, (1997).
- [3] Chen, R. H. "A parametric study of NO₂ emission from turbulent H₂ and CH₄ jet diffusion flames", *Combustion and flame*, 112(1-2): 188-198, (1998).
- [4] Ma, C. Y., Mahmud, T., Gaskell, P. H., and Hampartsoumian, E. "Numerical predictions of a turbulent diffusion flame in a cylindrical combustor using eddy dissipation and flamelet combustion models", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 213(7): 697-705, (1999).
- [5] Morvan, D., Porterie, B., Loraud, J. C., and Larini, M. "Numerical simulation of a methane/air radiating turbulent diffusion flame", *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 10(2): 196-227, (2000).
- [6] Keramida, E. P., Liakos, H. H., Founti, M. A., Boudouvis, A. G., and Markatos, N. C. "The discrete transfer radiation model in a natural gas-fired furnace", *International journal for numerical methods in fluids*, 34(5): 449-462, (2000).
- [7] Ilbas, M., Crayford, A. P., Yılmaz, I., Bowen, P. J., and Syred, N. "Laminar-burning velocities of hydrogen-air and hydrogen-methane-air mixtures: an experimental study", *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(12): 1768-1779, (2006).
- [8] Park, J., Keel, S. I., and Yun, J. H. "Addition effects of H₂ and H₂O on flame structure and pollutant emissions in methane-air diffusion flame", *Energy & Fuels*, 21(6): 3216-3224, (2007).
- [9] Khelil, A., Naji, H., Loukarfi, L., and Mompean, G., "Prediction of a high swirled natural gas diffusion flame using a PDF model", *Fuel*, 88:374-381, (2009).
- [10] Hu, E., Huang, Z., Zheng, J., Li, Q., and He, J. "Numerical study on laminar burning velocity and NO formation of premixed methane-hydrogen-air flames", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(15): 6545-6557, (2009).
- [11] Liu, H., Dong, S., Li, B. W., and Chen, H. G., "Parametric investigations of premixed methane-air combustion in two-section porous media by numerical simulation", *Fuel*, 89(7): 1736-1742, (2010).
- [12] Bhadraiah, K., and Raghavan, V. "Numerical simulation of laminar co-flow methane-oxygen diffusion flames: effect of chemical kinetic mechanisms", *Combustion Theory and Modelling*, 15(1): 23-46, (2010).
- [13] Saqr, K. M., Aly, H. S., Sies, M. M., and Wahid, M. A., "Effect of free stream turbulence on NO_x and soot formation in turbulent diffusion CH₄-air flames", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(6): 611-617, (2010).
- [14] Khanafer, K., and Aithal, S. M., "Fluid-dynamic and NO_x computation in swirl burners", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(23-24): 5030-5038, (2011).
- [15] Monaghan, R. F., Tahir, R., Cuoci, A., Bourque, G., Furi, M., Gordon, R. L., and Curran, H. J. "Detailed multi-dimensional study of pollutant formation in a methane diffusion flame", *Energy & fuels*, 26(3): 1598-1611, (2012).
- [16] İlbaş, M., and Yılmaz, İ., "Experimental analysis of the effects of hydrogen addition on methane combustion", *International Journal of Energy Research*, 36(5): 643-647, (2012).
- [17] Yılmaz, I., "Effect of swirl number on combustion characteristics in a natural gas diffusion flame", *Journal of Energy Resources Technology*, 135(4): 042204, (2013).
- [18] Abdul-Sater, H., and Krishnamoorthy, G., "An assessment of radiation modeling strategies in simulations of laminar to transitional, oxy-methane, diffusion flames", *Applied Thermal Engineering*, 61(2): 507-518, (2013).
- [19] Yılmaz, İ., Taştan, M., İlbaş, M., and Tarhan, C. "Effect of turbulence and radiation models on combustion characteristics in propane-hydrogen diffusion flames". *Energy conversion and management*, 72: 179-186, (2013).
- [20] İlbaş, M., Karyeyen, S., and Yılmaz, İ. "Effect of swirl number on combustion characteristics of hydrogen-containing fuels in a combustor", *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(17): 7185-7191, (2016).
- [21] Yılmaz, H., Cam, O., Tangoz, S., and Yılmaz, I., "Effect of different turbulence models on combustion and emission characteristics of hydrogen/air flames", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40): 25744-25755, (2017).
- [22] Karyeyen, S., and Ilbas, M., "Turbulent diffusion flames of coal derived-hydrogen supplied low calorific value syngas mixtures in a new type of burner: An experimental study", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4): 2411-2423, (2017).
- [23] Ilbas, M., and Karyeyen, S. "Turbulent diffusion flames of a low-calorific value syngas under varying turbulator angles", *Energy*, 138: 383-393, (2017).
- [24] Rashwan, S. S., "The Effect of Swirl Number and Oxidizer Composition on Combustion Characteristics of Non-Premixed Methane Flames", *Energy & Fuels*, 32(2): 2517-2526, (2018).
- [25] Fluent, A. (2017). 18.0 ANSYS Fluent theory guide 18.0. *Ansys Inc.*
- [26] Spangelo Ø. "Experimental and theoretical studies of a lox NO_x swirl burner" *PhD Thesis, The Norwegian University of Science and Technology*, September 2004.



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Model tabanlı tasarım metotları kullanılarak gerçek zamanlı bir görüntü işleme sisteminin tasarımı ve gerçekleştirilmesi

Design and implementation of a real-time image processing system using model-based design methods

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa Yusuf DEMİRCİ¹, İsmail YABANOVA²

ORCID¹: 0000-0002-5254-2990

ORCID²: 0000-0001-8075-3579

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Demirci M. Y., Yabanova İ., “Model tabanlı tasarım metotları kullanılarak gerçek zamanlı bir görüntü işleme sisteminin tasarımı ve gerçekleştirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 827-838, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.423603

Model Tabanlı Tasarım Metotları Kullanılarak Gerçek Zamanlı Bir Görüntü İşleme Sisteminin Tasarımı ve Gerçekleşmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mustafa Yusuf DEMİRCİ*, İsmail YABANOVA

Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik – Elektronik Mühendisliği, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye

ÖZ

Bu çalışmada gerçek zamanlı bir görüntü işleme sisteminin tasarımı Zynq mimarisi ve model tabanlı tasarım araçları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistemde FPGA ve mikroişlemci birleşiminden oluşan yeni bir mimari olan Zynq-7000 yongasını barındıran bir geliştirme kartı kullanılmış ve bu sisteme uyumlu olan yüksek çözünürlüklü bir kamera ile alınan görüntü üzerinde gri ton dönüşümü, kenar bulma, gürültü giderme ve keskinleştirme filtreleri uygulanarak gerçek zamanlı bir biçimde işlenmiş olan görüntü monitöre aktarılmıştır. Sistemde kullanılan filtre donanım tasarımları HDL kodu yazılmadan Matlab/Simulink ortamında HDL Coder aracı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kameradan görüntü alan sistemin donanım tasarımı Xilinx firmasının geliştirdiği Vivado Suite isimli araçla yine model tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Son olarak tasarlanan donanıma uygun yazılımın geliştirilmesi yapılarak sonuçlar ve sistemin kaynak kullanımı incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda sistemin gerçek zamanlı olarak başarıyla çalıştığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Görüntü işleme, gerçek zamanlı sistemler, FPGA, Zynq, model tabanlı tasarım.

Design and Implementation of a Real-Time Image Processing System Using Model-Based Design Methods

ABSTRACT

In this study, design of a real-time image processing system was implemented using Zynq architecture and model-based design tools. System uses a development board that includes Zynq-7000 chip, a new architecture which consists of FPGA and microprocessor, and the images were captured with a high-resolution camera compatible with this system. Processed images transferred to the monitor in real-time with applying grayscale conversion, edge detection, noise reduction and sharpening filters. The filter hardware designs used in the system were implemented by using HDL Coder tool in Matlab / Simulink environment without using hand-coded HDL. The hardware design of the system that takes images from the camera has been implemented with the model-based hardware development tool Vivado Suite which developed by Xilinx company. Finally, an appropriate software for the hardware has been developed and results and the resource usage of the system have been analyzed. As a result of the work done, it has been observed that the system works successfully in real time.

Keywords: Image processing, real-time systems, FPGA, Zynq, model-based design.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde birçok alanda kullanılan görüntü işleme sistemlerinin değişen ihtiyaçlar ve teknolojinin de gelişimiyle birlikte gerçek zamanlı olarak kullanımı ihtiyacı doğmuştur. Özellikle sürüş destek sistemleri, otonom araçlar, uçuş kontrol, güvenlik ve savunma sistemleri gibi alanlarda yoğun olarak kullanılan gerçek zamanlı gömülü sistem tasarımlarında hızdan ziyade istenen işin belirlenmiş olan bir zaman dilimi içerisinde yapılması önceliklidir. Bu sebeple zaman kararlılığı ile birlikte öngörülebilirlik özellikleri gerçek zamanlı sistemler için olmazsa olmaz koşullardır [1].

Bu tip gerçek zamanlı görüntü işleme sistemlerde görüntü üzerinde çeşitli filtreler ve öznelik çıkarma gibi işlemler yapılması gerektiğinden yoğun bir işlem gücüne

ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle yüksek çözünürlüklere ihtiyaç duyulan sistemlerde görüntü karesindeki her pikselin ayrı ayrı ve çok kısa bir zaman diliminde işlenmesi gereği mikroişlemci tabanlı klasik sistemleri yetersiz kılmış ve böylece farklı çözüm arayışları ortaya çıkmıştır. Bunlar içerisinde DSP, FPGA ya da GPU tabanlı sistemler olduğu gibi bunların bir arada bulunduğu “yonga üzeri sistem” (SoC-System on Chip)’ler giderek daha yaygın hale gelmiştir. DSP (Dijital Signal Processor – Sayısal Sinyal İşleyici) tabanlı sistemler içerisinde Texas Instruments firmasının geliştirmiş olduğu DaVinci ve OMAP serisi yongalar örnek gösterilebilirken, NXP firmasının S32V34 serisi yongaları gibi işlemci, GPU ve özel görüntü işleyici birimlerinin bir arada bulunduğu sistemlerde bulunmaktadır [2,3,4]. Bu tip sistemler DSP’lerin ve yardımcı işlemcilerin sinyal işlemedeki avantajlarını kullanarak donanım hızlandırıcısı olarak görüntü işleme

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mfecidpc@gmail.com

sistemlerinde gerçek zamanlı çalışmayı sağlayabilmektedirler. Bununla birlikte DSP'ler sabit mimariler olduklarından üreticinin destek verdiği kütüphaneler ve arayüzler ile programlanarak nispeten kısıtlı bir alana hitap etmektedirler [5]. Diğer yandan paralel işlem yapmaya daha elverişli yapısı ve düşük güç tüketimi nedeniyle alan programlanabilir kapı dizilerinin (FPGA) bu tip gömülü sistemlerde kullanımını artırmıştır. FPGA tabanlı sistemlerde donanım tamamen istenen mimaride programlanabilir. İstenen donanım bir DSP olabileceği gibi tamamen çalışacak sisteme özel oluşturulmuş bir donanım bloğu da olabilmektedir. Ayrıca Xilinx Zynq gibi yeni nesil mimarilerde işlemci ve programlanabilir lojik bloğu birlikte bulunmakta ve bu sistemler tıpkı DSP'ler gibi C dili ile programlanabilmekte, hatta Matlab, Labview gibi model tabanlı geliştirme ortamlarında dahi donanım tasarımı yapılabilmektedir. Bu sebeple önerilen görüntü işleme sisteminde FPGA tabanlı bir sistem tercih edilmiştir. Tüm bu gelişmeler neticesinde mikroişlemci ve FPGA donanımını bir arada kullanan sistemlerin kullanımının görüntü işleme sistemlerinde en iyi performansı verdiği tespit edilmiştir [6]. Bu tip çözümler bilgisayar ve FPGA donanımının bir arada kullanılması ile oluşturulduğunda yüksek güç ve alan tüketimini beraberinde getirdiği için gömülü sistem tasarımlarında bu tip bir kullanım pratik olmamaktadır. Xilinx firması tarafından 2012 yılında tanıtılan Zynq mimarisi aynı yonga içerisinde mikroişlemci ve FPGA donanımını barındıran yapısıyla gömülü sistem piyasasında çok önemli bir açığı kapatmıştır. Bu yonga üzeri sistem mimarisi sayesinde donanım ve yazılımın tamamı tek bir kart üzerinde gerçekleştirilerek hem yüksek hız, hem de düşük güç ve alan tüketimi gerçekleştirmek mümkün olabilmektedir. Bu nedenle çalışmada Zynq-7000 mimarisine sahip olan Zedboard geliştirme kartı kullanılmıştır. Tüm bu avantajların yanında donanım tasarımının karmaşık olması ve klasik mikroişlemci sistemlerinden farklı yapısı nedeniyle Zynq kullanılarak yapılan tasarımlar uzun bir geliştirme süreci ve farklı disiplinlerden oluşan bir geliştirme ekibi gerektirebilmektedir [7].

İlgili literatür incelendiğinde Zynq mimarisi ile görüntü işleme üzerine yapılan bazı önemli çalışmalar özetlenmiştir. Abdelgawad ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Zynq platformu kullanan ZC702 geliştirme kartı üzerinde gerçek zamanlı olarak Canny Kenar bulma algoritmasını uygulamışlardır. Sistemi Vivado HLS ve dahili video kütüphanesini kullanarak tasarlamış ve 1080p çözünürlükte 60 fps hızda çalışabilen bir sistem oluşturmuşlardır [6]. Russell ve Fischhaber yaptıkları çalışmada Zedboard geliştirme kartı üzerine yerleştirilen tümleşik bir kamera sistemi ile 1920 x 1080 çözünürlükteki görüntüyü gerçek zamanlı olarak alıp trafik işaretlerinin görüntülerini tanıma ve sınıflandırma yapan bir sistem geliştirmişlerdir. Tüm projeyi OpenCV kütüphanelerini kullanarak altı hafta gibi bir sürede oluşturmuşlar ve böylece platformun hızlı tasarım yapılabilme özelliğini vurgulamışlardır. Geliştirilen sistemde bir trafik işaretini sınıflandırmanın yaklaşık

olarak 5 saniye süre aldığı belirtilmiştir [8]. Monson ve arkadaşları yaptıkları çalışmada optik akış algoritmalarını optimize ederek farklı platformlarda yürütüp karşılaştırmalar yapmışlardır. Buna göre aynı algoritma Core i7 işlemcili bir bilgisayarda, Zynq-7000 yongasının yalnızca ARM işlemci biriminde ve son olarak Zynq-7000 mimarisinin programlanabilir lojik birimine özel en iyileştirme yapılarak yürütülmüştür. Sistemin kodu C dilinde Vivado HLS programı kullanılarak sentezlenmiştir. Sonuçlara bakıldığında Zynq üzerinde yürütülen algoritmanın performansı i7 işlemcili bir bilgisayarın performansına yakın olmakla birlikte güç tüketiminin yalnızca bilgisayarın 1/7 si kadar olduğu görülmüştür [9]. Sümer yaptığı çalışmada farklı yüz tanıma metodlarını kullanarak duygu ve yüz ifadesi analizi uygulaması gerçekleştirmiştir. Zynq-7000 platformunu kullanan Zedboard geliştirme kartında OpenCV kütüphaneleri, C++ dili ve gömülü Linux işletim sistemi kullanılarak yapılan çalışmada öfke, mutluluk ve şaşırma ifadeleri sırasıyla %97, %100 ve %97 başarıyla sınıflandırılmış ve yaklaşık saniyede 4 ile 5 kare hızında bir performans elde edilmiştir [10]. Altuncu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada bazı görüntü işleme algoritmalarını Zedboard geliştirme kartı üzerinde Verilog donanım tanımlama dilini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Usb üzerinden webcam ile alınan 256 x 256 piksel boyutundaki görüntü üzerinde gerçek zamanlı olarak filtre işlemlerini saniyede yaklaşık 40 kare hızında uygulamayı başarmışlardır [11]. Chhabra ve arkadaşları Zynq-7000 platformunu barındıran XC7Z020-1CLG484 geliştirme kartı üzerinde bir otomatik plaka tanımlama sistemi tasarlamışlardır. Tüm sistem donanımı MATLAB Simulink ve Xilinx System Generator geliştirme ortamı kullanılarak yüksek seviyeli sentez araçları ile tasarlanmış, gerçekleştirilen uygulamalar içerisinde en verimli olanı tespit edilmiş ve her üç yöntemin de %90'ın üzerinde başarılı olduğu tespit edilmiştir [12]. Shi yaptığı çalışmada Zynq-7000 mimarisine sahip Zedboard üzerinde Sobel kenar belirleme filtresini Vivado HLS aracını kullanarak gerçek zamanlı olarak gerçekleştirmiştir. Görüntü aktarımındaki gecikmeyi önlemek için OpenCV'de yazılmış olan Sobel filtre algoritmasını iyileştirerek daha hızlı çalışmasını sağlamış ve önceki incelediği tasarımlardan %75 daha az kaynak kullanımına rağmen %30 daha fazla performans elde ederek 1080p çözünürlükte maksimum 90,1 fps hıza ulaşabilmiştir [13]. Al-Naqshbandi yaptığı çalışmada Zedboard üzerinde Canny kenar belirleme algoritmasını uygulayıp en iyileştirmesini gerçekleştirmiştir. OpenCV kütüphaneleri kullanılarak yapılan çalışmada Canny kenar belirleme algoritmaları başarıyla uygulanmış ve yüksek seviyeli sentez araçları ile donanım tasarımını gerçekleştirmiştir. Çalışmada algoritmaların performans analizleri yapmış ve yaptığı geliştirmeler sonucunda çekirdek düzeyine 3 kata kadar, uygulama düzeyinde ise 7 kata kadar daha hızlı çalışma sağlandığı belirtmiştir [14].

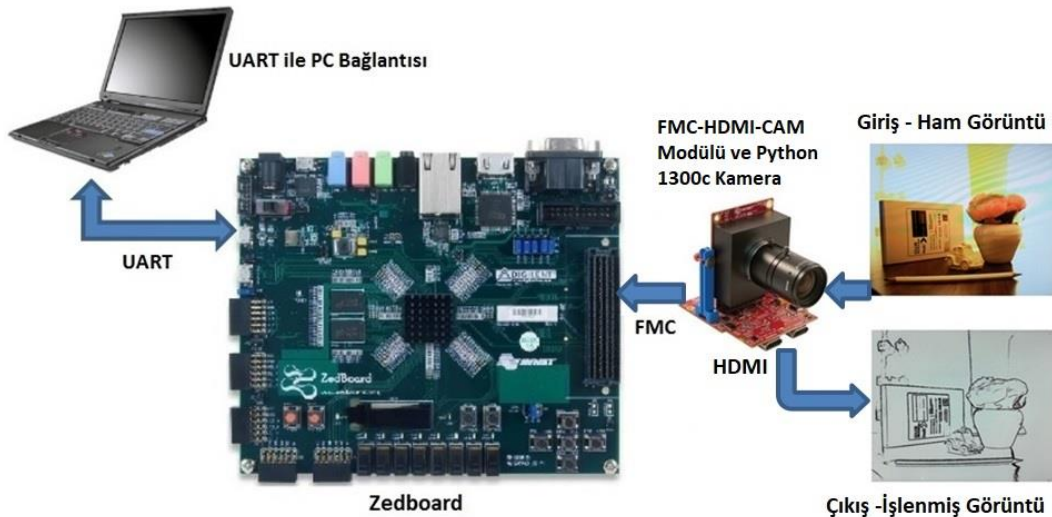
Yukarıda belirtilen çalışmalar incelendiğinde tasarım süresini azaltmak için kullanılan yüksek seviyeli sentez araçlarının genellikle Vivado HLS isimli C kodu yazılarak donanım tasarımı yapılabilen araç olduğu görülmektedir. Bu çalışmada ise belirtilen tasarım karmaşıklığına çözüm aranarak bir adım daha ileri gidilerek tamamen yüksek seviyeli dillerle gerçek zamanlı bir görüntü işleme sisteminin oluşturulması amaçlanmıştır. Tasarım karmaşıklığının azaltılması amacıyla donanım tanımlama dilleri kullanımı yerine model tabanlı tasarım yazılımları olan Matlab/Simulink ve bu program üzerinde çalışan HDL Coder, Embedder Coder, Vision HDL Toolbox isimli yüksek seviyeli sentez araçları ile donanım tasarımı yapılmıştır. Sistemin kamera referans tasarımı ve sistem yazılımı ise Xilinx'in kendi araçları olan Vivado Design Suite ve SDK yazılım geliştirme aracı ile oluşturulmuştur. Tasarlanan sistem ile kameradan anlık olarak alınan yüksek çözünürlüklü görüntü gri ton, kenar bulma, gürültü giderme ve

keskinleştirme filtrelerine tabi tutularak işlenmiş görüntü gecikmesiz olarak monitöre aktarılmıştır.

2. DONANIM ALTYAPISI

(HARDWARE SUBSTRUCTURE)

Tasarlanan sistemde Zynq-7000 mimarisine sahip Zedboard geliştirme kartı ile birlikte Avnet firmasının ürettiği FMC-HDMI-CAM modülü ve yine sistemle tam uyumlu olan Python 1300-C kamera modülü kullanılmıştır [15, 16]. FMC, FPGA ara bağlantısı anlamına gelmekte olup, FPGA kartları için yüksek hızlarda çalışabilen standart bir arayüzü tanımlar. Böylece çevre birimleri ile FPGA kartları arasında kolayca bağlantı yapılabilir ve bu arayüze sahip tüm kartlar kullanılabilir [17]. Sistemin bilgisayar ile bağlantısı UART üzerinden sağlanmış olup sistem durumu seri port üzerinden izlenebilmektedir. Bununla birlikte sistem bağımsız olarak çalışmakta ve bilgisayar bağlantısına ihtiyaç duymamaktadır.



Şekil 1. Tasarlanan Sistemin Genel Şeması (General Schematic of the Designed System)

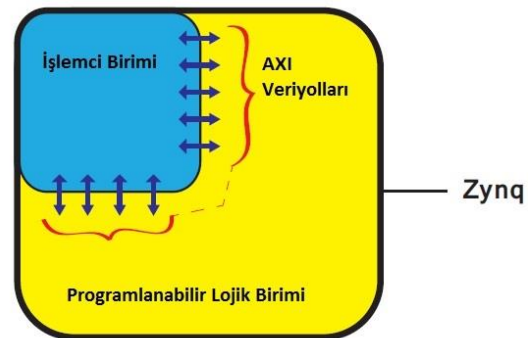
Zedboard üzerindeki buton ve anahtarlar yardımıyla istenen filtre seçilebilmekte ve diğer parametreler ayarlanabilmektedir. Sistemin genel şeması Şekil 1.de verilmiştir.

2.1 Zynq-7000 Mimarisi (Zynq-7000 Architecture)

Çalışmada kullanılan Zedboard geliştirme kartı Zynq-7000 Z-7020 serisi yonga üzeri sistem ve çevre birimlerinden oluşmaktadır [18]. Zynq-7000, çift çekirdekli ARM Cortex-A9 mimarisine sahip işlemci ile FPGA bileşenlerini aynı yonga içerisinde barındıran Tümüyle Programlanabilir Yonga Üzeri Sistem mimarisidir. Bu sistemde işlemci ile FPGA arasındaki veri aktarımını sağlamak amacıyla yüksek hızlı AXI (gelişmiş genişletilebilir arabirim) veri yolları bulunmaktadır. Böylece bu iki birimin birbirinden bağımsız olmaksızın amaca yönelik olarak bir arada kullanılması olanaklı hale gelmiştir. Zynq-700 AP SoC, temel olarak işlemci birimi (PS- Processing System), FPGA sistemine karşılık gelen bir programlanabilir lojik

biriminden (PL - Programmable Logic) ve ara bağlantılardan meydana gelir [19].

Şekil 2.de Zynq mimarisinin basit prensip şeması verilmiştir.



Şekil 2. Zynq-7000 Mimarisi Basit Prensip Şeması (Zynq-7000 Architecture Simple Principle Diagram)

2.2 Sistem Tasarım Akışı (System Design Flow)

Şekil 3'te görüntü işleyici sisteminin genel tasarım akışı görülmektedir. Sistemin donanım bileşenleri bir araya getirildikten sonra ilk olarak kameradan görüntü alabilen bir referans tasarımın gerçekleştirilmesi gerekmektedir [20, 21]. Kameradan görüntü başarılı bir biçimde alındıktan sonra kullanılacak olan filtrelerin Matlab/Simulink ortamında tasarımı ve simülasyonu yapılarak HDL Coder aracı ile bu filtreler standart IP blokları olarak paketlenmiştir [22]. Bu IP blokları Vivado ortamına dahil edilerek oluşturulmuş olan kamera referans tasarımına entegre edilmiştir. Son olarak sistemin yazılımı Xilinx SDK ortamında yazılarak ve gerekli sürücüler sisteme dahil edilerek sisteme son şekli verilmiştir [23].



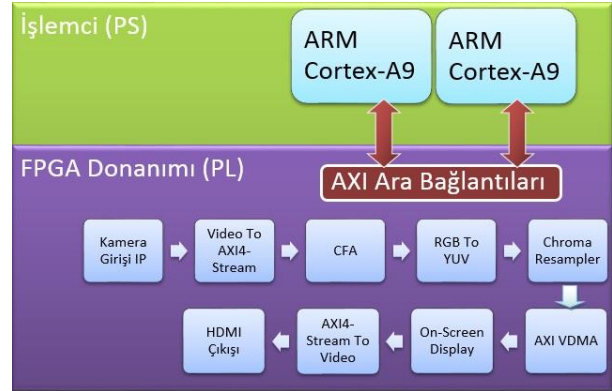
Şekil 3. Görüntü İşleyici Sistemi Tasarım Akışı (Image Processor System Design Flow)

2.3 Kamera Referans Tasarımı (Camera Reference Design)

Çalışmada Avnet tarafından üretilen FMC-HDMI-CAM modülü kullanılarak yüksek hızlı FMC arabirimi üzerinden kamera ile bağlantı sağlanmıştır. Görüntü algılayıcı olarak bu modüle uyumlu olan Python-1300c kamera modülü seçilmiştir. Bu modül ON Semiconductor firmasının Python-1300 görüntü algılayıcısına sahip 1280 x 1024 piksel çözünürlükte 210 kare/saniye hıza kadar görüntü aktarma kapasitesine sahiptir [16]. Böylece gerçek zamanlı bir sistem için gerekli olan altyapı oluşturulmuştur.

Oluşturulan referans tasarımın amacı, kullanılan kamera sensöründen gelen ham görüntü üzerinde bazı işlemler yaparak görüntüyü kullandığımız AXI4-Stream veri tipine dönüştürerek daha sonraki işlemler için hazır hale getirmektir. Bu sayede kameradan alınan görüntü kareleri hatasız biçimde ekrana aktarılabilmiştir. Bu işlemler gerçekleştirildikten sonra görüntü işleme için gerekli olan IP bloklarının tasarımı kamera referans tasarımına göre yapılmıştır. Kameradan görüntüyü doğru biçimde alabilmek için "Xilinx Video and Image Processing Pack" ve kamera donanımı için sağlanan 3.parti IP bloklarının indirilerek sisteme dahil edilmesi

gerekmektedir [24, 25]. Gerekli işlemler tamamlandıktan sonra sentez ve gerçekleştirme aşamasına geçilerek sistemin test yazılımı düzenlenerek görüntü başarıyla ekrana yansıtılmıştır. Şekil 4'te kamera referans tasarımının ve kullanılan IP bloklarının sistemdeki durumu görülmektedir.



Şekil 4. Kamera Referans Tasarımı Şematik Gösterimi (Camera Reference Design Schematic Display)

Sistemde kamera üzerinden görüntü öncelikle AXI4-Stream veri tipine dönüştürülmekte, ardından CFA IP bloğu ile eksik renk bileşenleri tekrar oluşturulmaktadır. Daha sonra RGB To YUV bloğu ile görüntü YCbCr formatına dönüştürülmektedir. Sonraki aşamada kullanılan Chroma Resampler IP bloğu ile görüntü 24 bit üzerinden 16 bitlik formata düşürülmüş ve On-Screen Display IP bloğu ile 1280 x 1024 piksel boyutundaki görüntü 1920 x 1080 piksel boyutlarındaki monitöre ortalanarak yerleştirilmiştir. Daha sonra görüntü monitöre aktarılmak üzere tekrar dönüştürülmüş ve FMC-HDMI-CAM modülü üzerindeki HDMI çıkışından monitöre bağlantı yapılmıştır [26,27,28,29,30]. AXI VDMA IP bloğu ile sistem belleği ile doğrudan veri alışverişini sağlanarak sistemin olası darboğazlardan korunması sağlanmıştır [31].

Şekil 5'te oluşturulan kamera referans sisteminin çalışma görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5. Kamera Referans Tasarımı Sistem Görüntüsü (Picture of The Camera Reference Design System)

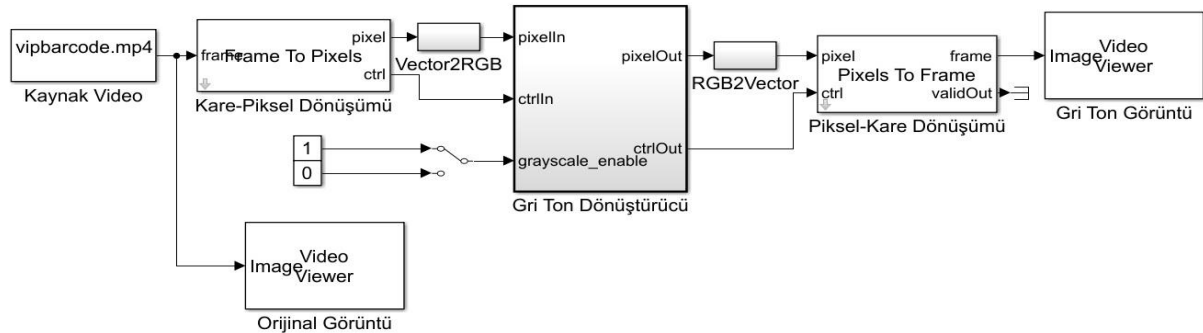
2.4 Görüntü İşleyici Sistemi (Image Processor System)

Kamera referans tasarımının ardından kullanılacak görüntü işleme filtrelerinin tasarımları yapılmıştır. Bu bölümde Xilinx ve Mathworks araçlarının bir arada kullanılması gerekmektedir [32, 33, 34]. Sistem tasarımı Simulink ortamında tamamen model tabanlı olarak yapılarak simülasyonları simulink üzerinde yapıldıktan sonra HDL Coder ile otomatik olarak HDL kodu üretilerek bu kodlar kullanılabilir IP paketlerine dönüştürülmüştür. Ayrıca Embedder Coder, Simulink Coder, Matlab Coder ve Vision HDL Toolbox isimli araçların ve bunların Zynq için olan ek paketlerinin de Matlab üzerinde kurulu olması gerekmektedir. Sistem tasarımında Vivado 2016.4 ve Matlab R2017b kullanılmıştır. Simulink üzerinde çalışan sistem akan piksel arayüzü olarak adlandırılan bir tür seri arabirimdir. Bu yöntemde pikseller seri biçimde aktarılır ve veri ile kontrol olmak üzere iki çeşit sinyal üzerinden veri aktarımı gerçekleşir. Bu arayüz AXI4-Stream ile birebir uyumlu olup tasarlanan IP bloklarının kamera referans sistemiyle tamamen uyumlu olarak çalışmasını sağlar [35]. Görüntü işleyici sisteminin genel yapısı Şekil 6.da gösterildiği gibidir.



Şekil 6. Video İşleyici Sistemi Blok Diyagramı (Video Processing System Block Diagram)

Simulink ortamında simülasyon yapılabilmesi için görüntü öncelikle “Kaynak Video” isimli blok üzerinden kareler halinde gelir ve ardından Kareden Piksele Dönüşüm bloğu ile seri hale getirilerek piksel formatına dönüştürülür. HDL Filtre bloğunda ise Zynq üzerinde çalışacak olan filtre sistemi bulunur ve filtreden geçen görüntü tekrar kareler haline dönüştürülerek işlenmiş görüntü “video viewer” bloğundan izlenebilmektedir. Böylece HDL koduna dönüşüm yapılmadan önce sistemin tepkisi gözlemek mümkün olmuştur.



Şekil 7. Gri Ton Dönüştürme Sistemi Blok Diyagramı (Grayscale Conversion System Block Diagram)

3. SİMULİNK ORTAMINDA SİSTEMİN TASARIMI VE SİMÜLASYONU (DESIGN AND SIMULATION OF THE SYSTEM IN SIMULINK ENVIRONMENT)

Çalışmada kullanılan filtreler Simulink ortamında Vision HDL Toolbox blokları ile ayrı ayrı tasarlandıktan her biri birer alt sistem haline getirilerek öncelikle Matlab üzerinde simülasyonları yapılmış, daha sonra HDL iş akışı danışmanı ile kullanılabilir IP bloklarına dönüştürülmüştür. Başta yapılan dört adet filtre tasarımı sistemde tüm filtrelerin aynı anda aktif edilebilmesi amacıyla birleştirilerek iki adet IP bloğuna indirgenmiştir. Bu sayede tasarım karmaşıklığı artmadan tüm filtreler aynı anda aktif edilebilmiştir.

3.1 Gri ton Dönüştürücü (Grayscale Converter)

Gri ton dönüştürme filtresi tasarlanırken Vision HDL Toolbox içerisindeki RGB To Intensity bloğu ile işlem yapılmıştır. Buna göre her üç renk değeri sabit katsayılarla çarpılarak gri ton değerleri elde edilmiştir [36]. Eşitlikteki katsayılar referans tasarımda kullanılan YUV formatına ve bu formatın en sık kullanılan kodlama biçimi olan ITU rec.601 standardına uygun olarak seçilmiştir [37, 38].

Formül 1.de gri ton değerlerinin bulunması için gereken katsayılar verilmiştir.

$$\text{piksel değeri} = [0,299 \quad 0,578 \quad 0,114] \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sistem Şekil 7.de görüldüğü gibi tasarlanmıştır. Simülasyon Simulink ortamında yapıldıktan sonra “Gri_ton_Donusturucu” isimli simulink bloğu içerisinde oluşturulan filtre sistemi HDL Coder ile IP bloğuna dönüştürülmüştür. Filtre IP bloğu tasarımının diyagramı Şekil 8.de verilmiştir. Simülasyon sonucu Şekil 9.da gösterilmiştir.

3.2 Kenar Bulucu (Edge Detector)

Kenar bulma yönteminin amacı görüntüdeki kenar hatlarının belirginleştirilerek öznitelik çıkarımının ve belirli şekillerin algılanmasının kolaylaşmasıdır. Kenar bulucu filtre tasarımında Vision HDL Toolbox üzerindeki Edge Detector bloğu kullanılmıştır [36]. Yöntem olarak Sobel yöntemi seçilmiştir. Sobel

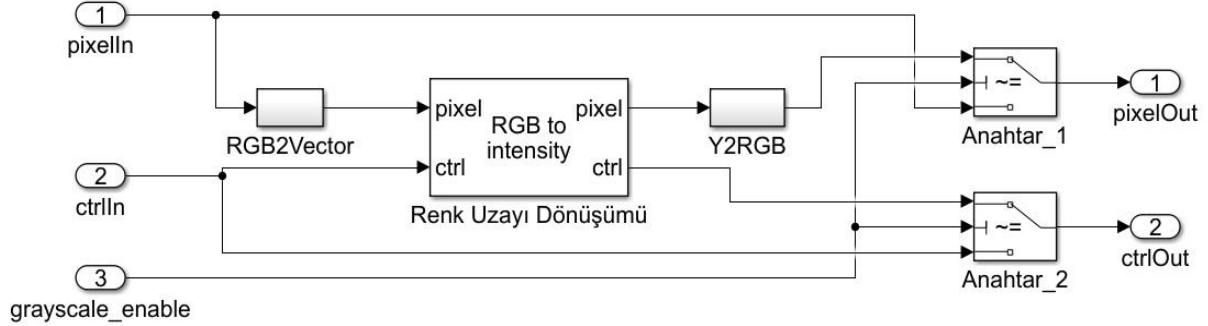
operatöründe gri ton görüntü üzerinde yatay ve dikey olmak üzere iki türevsel matris ile maskeleyme yapılarak görüntünün gradyan bileşenleri elde edilir. Elde edilen bileşenlerin ağırlıkları hesaplanarak kenarları bulunmuş görüntü oluşturulur.

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (4)$$

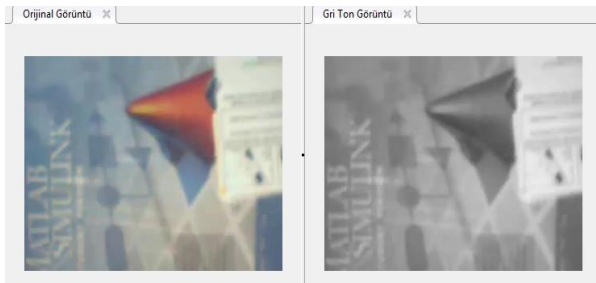
Gy = Düşey Gradyan Bileşeni

Gx = Yatay Gradyan Bileşeni

Gradyan değerleri Formül 4.e göre birleştirilerek



Şekil 8. Gri Ton Dönüştürücü IP Bloğu (Grayscale Convertor IP Block)



Şekil 9. Gri Ton Dönüştürme Simülasyon Sonucu (Grayscale Conversion Simulation Result)

kenarlar elde edilir. Sistemin blok diyagramı Şekil 10.da gösterildiği gibidir. Simülasyon sonucu ise Şekil 11.de verilmiştir.

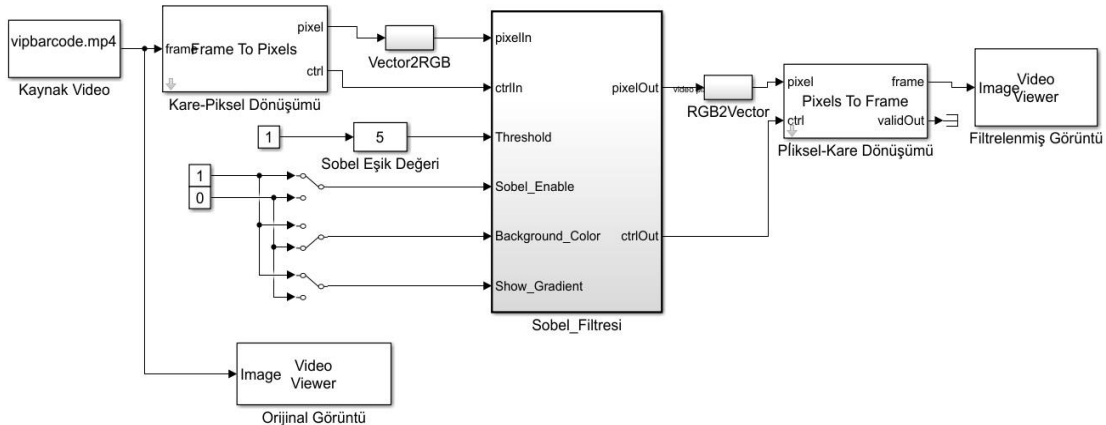
3.3 Ortanca Filtre (Median Filter)

Ortanca filtre özellikle görüntü üzerindeki tuz-biber gürültüsünün giderilmesinde kullanılan doğrusal olmayan bir filtre çeşididir. Çalışma prensibi 2 boyutlu değişken uzunluktaki bir matris oluşturularak pikseller kendi içerisinde sıralanarak ortanca eleman bulunması şeklindedir. Medyan filtre tasarımında Vision HDL Toolbox üzerindeki Median Filter bloğu kullanılmıştır [36]. Simulink ortamında yapılan simülasyonda filtre etkisinin net olarak görülebilmesi için görüntü üzerine %1 oranında gürültü eklenmiştir. Sistemin blok diyagramı Şekil 12.de verilmiştir. 3 x 3, 5 x 5 ve 7 x 7 komşuluk matrisine göre ortanca filtre sonuçları Şekil 13.te gösterildiği gibidir.

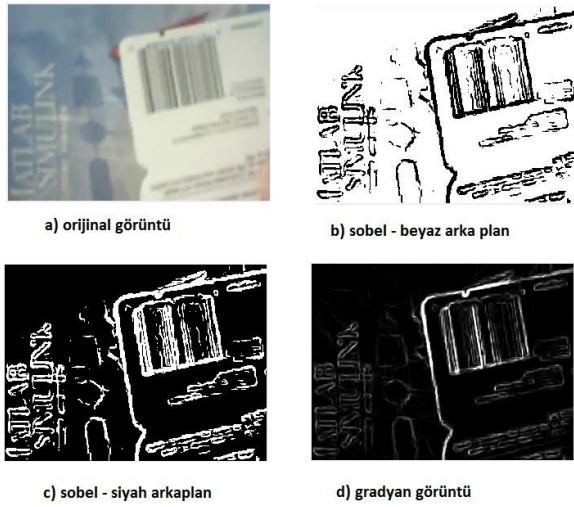
Kenar bulucu bloğu gradyan değerlerini 45 ve 135 derece açılarda belirler ve Formül 2. ile Formül 3.teki matrisleri kullanır [39].

$$G_y = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$G_x = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$



Şekil 10. Kenar Bulucu Sistem Blok Diyagramı (Edge Detector System Block Diagram)



Şekil 11. Kenar Bulucu Simülasyon Sonucu (Edge Detector Simulation Result)

3.4 Keskinleştirici Filtre (Sharpening Filter)

Tasarlanan son sistemde keskinleştirme işlemi yapılmıştır. Bunun için Vision HDL Toolbox altındaki Image Filter bloğu kullanılmıştır [36]. Bu filtrede

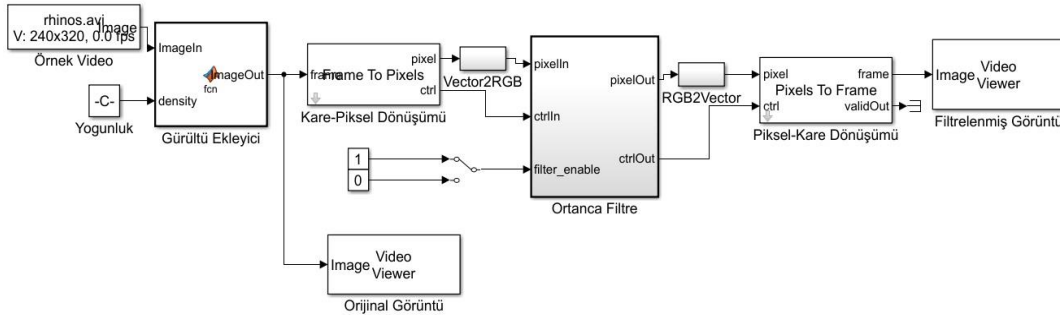
“fspecial” komutu kullanılarak ikinci derece bir türev fonksiyonu olan laplasyen filtre ile işlem yapılmıştır. Laplasyen filtrenin genel ifadesi Formül 5 ve Formül 6 da gösterilmiştir.

Tasarlanan filtre sisteminde $\alpha=0,2$ olarak alınmıştır. Ayrıca simulink’in programı konvolüsyon sonucunun daima sıfır olabilmesi için denklem üzerinde yaptığı kaydırma işlemleri sebebiyle filtrede kullanılan konvolüsyon matrisi Formül 7.deki elemanlardan oluşmuştur [39]. Uygulamada keskinleştirici filtre ortanca filtre ile birlikte gerçekleştirilmiştir. Bunun sebebi keskinleştirici filtrenin ortanca filtrenin meydana getirdiği bulanıklığı giderici etki göstermesidir. Sistemin blok diyagramı Şekil 14.te, filtre sonuçları ise Şekil 15.te verilmiştir.

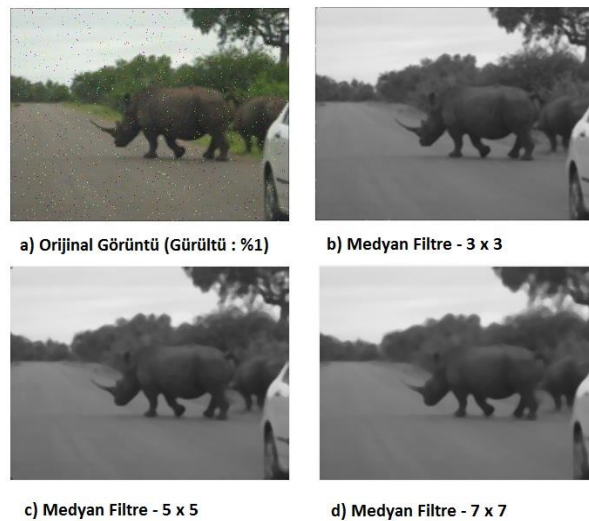
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (5)$$

$$\nabla^2 = \frac{4}{(\alpha+1)} \begin{bmatrix} \frac{\alpha}{4} & \frac{1-\alpha}{4} & \frac{\alpha}{4} \\ \frac{1-\alpha}{4} & -1 & \frac{1-\alpha}{4} \\ \frac{\alpha}{4} & \frac{1-\alpha}{4} & \frac{\alpha}{4} \end{bmatrix} \quad (6)$$

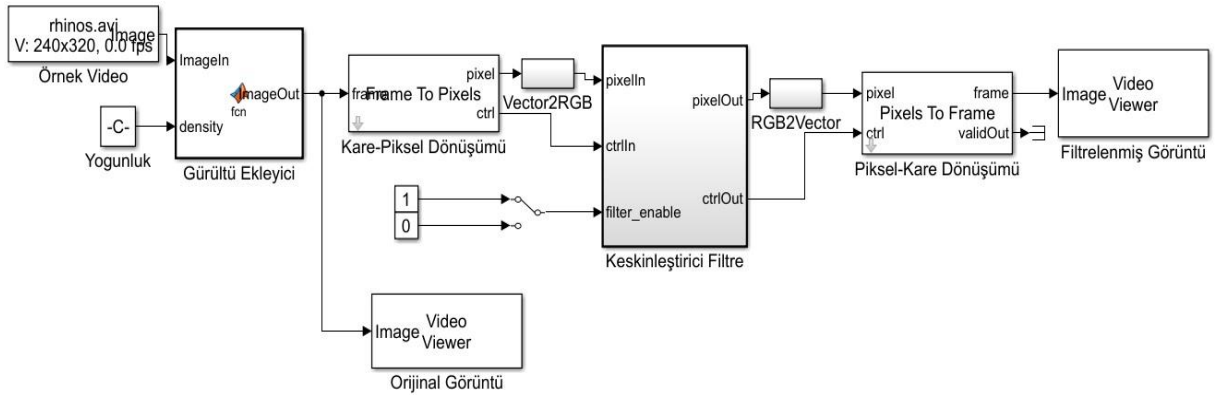
$$\nabla^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$



Şekil 12. Ortanca Filtre Sistem Blok Diyagramı (Median Filter Block Diagram)



Şekil 13. Ortanca Filtre Simülasyon Sonucu (Median Filter Simulation Result)



Şekil 14. Keskinleştirici Filtre Sistem Blok Diyagramı (Sharpening Filter Block Diagram)



a) 3 x 3 Medyan Filtreli Görüntü



b) Keskinleştirilmiş Görüntü

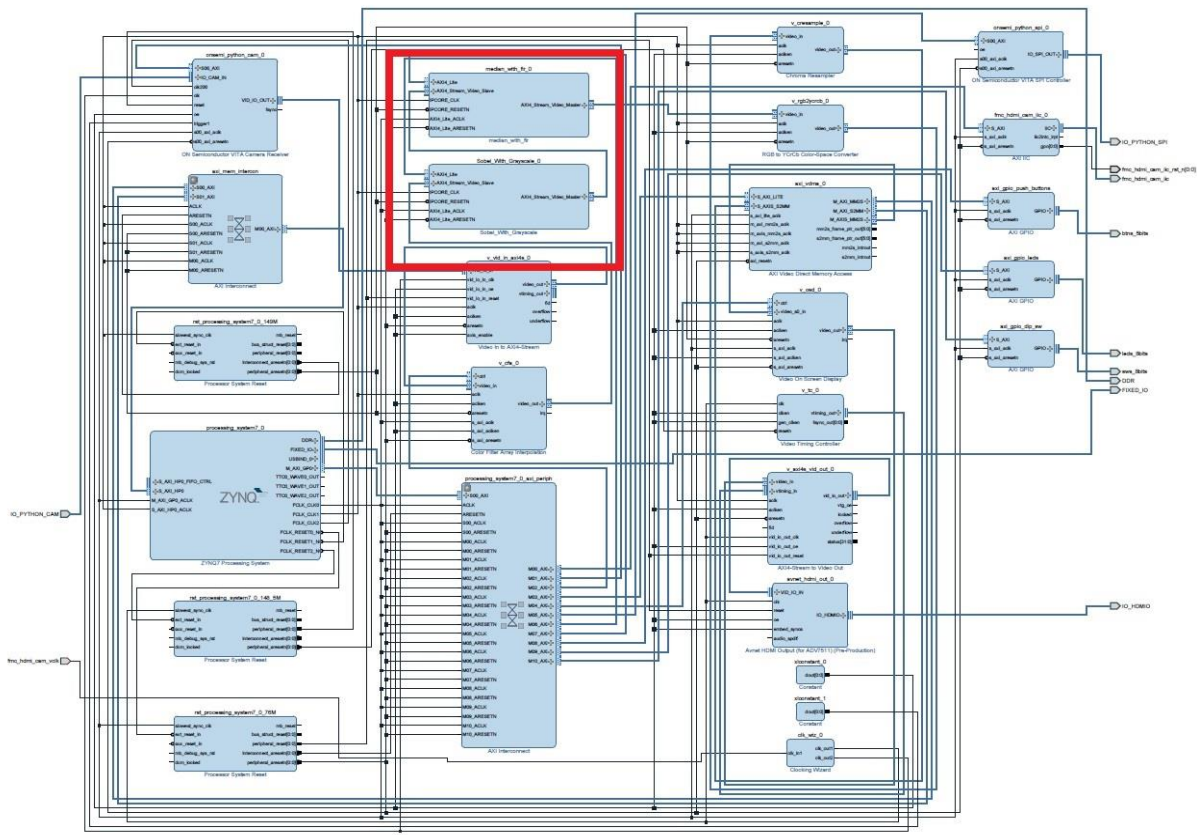


c) 5 x 5 Medyan Filtreli Görüntü



d) Keskinleştirilmiş Görüntü

Şekil 15. Keskinleştirici Filtre Simülasyon Sonucu (Sharpening Filter Simulation Results)



Şekil 16. Tüm Sistem Donanım Tasarımı Blok Şeması (Complete System Hardware Design Block Diagram)

4. TASARIMLARIN SENTEZLENMESİ VE BULGULAR (DESIGN SYNTHESIS AND RESULTS)

Tasarımların simulink üzerindeki simülasyonları tamamlandıktan sonra her bir filtre sistemi ayrı ayrı HDL koduna çevrilmiştir. Bu işlem Matlab/Simulink eklentisi olan HDL Coder ve HDL iş akışı danışmanı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. HDL iş akışı danışmanı, Matlab ve Simulink üzerindeki sistemleri HDL koduna çevirme işlemi sırasında gerekli ayarların yapılmasını sağlayan bir arayüzdür. Bu aşamadan sonra standart bir IP bloğuna çevrilen sistem Vivado Suite içerisinde bulunan IP entegre edici sistemi ile kamera referans tasarımına bağlanmıştır. Böylece filtre sistemleri Zedboard üzerinde sırası ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki çalışmalarda ise sistemin yonga üzerinde daha az alan kaplaması ve yazılımın sadeleşmesi amacıyla tasarlanan IP blokları Simulink üzerinde bir araya getirilerek tekrar tasarım yapılmıştır.

Buna göre gri ton dönüştürme ve kenar bulma sistemleri tek bir IP bloğu haline getirilmiştir. Orta ve keskinleştirme filtreleri ise ikinci IP bloğunu oluşturmuşlardır. Gerekli ara bağlantılar tekrar yapılarak sistem tekrar sentezlenerek gerçekleştirilmiştir. Gerçeklenen son sistemin Vivado Suite üzerindeki blok tasarımı Şekil 16.da verilmiştir. Çalışmada tasarlanan IP blokları şema üzerinde işaretlenmiştir.

4.1 Sentez Sonuçları (Synthesis Results)

Sistemin sentezi ve yonga üzerindeki yerleşimi tamamlandıktan sonraki kaynak kullanımı Çizelge 1.de verilmiştir. Görüldüğü üzere mevcut kaynakların en fazla %35'lik bir kısmı kullanılmıştır. Burada herhangi bir optimizasyon çalışması yapılmadığı da göz önünde bulundurulmalıdır.

Sistemde ana saat hızı 148,50 MHz, kamera ve görüntü işleme bloklarının çalıştığı piksel saat hızı ise 108 MHz olarak belirlenmiştir. Sistemin çalışma hızı Formül 8.deki gibi hesaplanmaktadır. Formülde EYH ekran yenileme hızını temsil ederken toplam yatay piksel ve toplam dikey piksel değerleri ise aktif pikseller ile boşluk pikselleri ve senkronizasyon piksellerinin toplamından oluşur [40].

$$EYH = \frac{\text{Piksel Saat Frekansı (Hz)}}{(\text{Toplam Yatay Piksel} + \text{Toplam Dikey Piksel})} \quad (8)$$

$$EYH = \frac{108\,064\,000}{[(1280+29+192+85) \times (1024+0+3+35)]} = 64,15 \quad (9)$$

Buna göre görüntü işleme sisteminin 1280 x 1024 çözünürlükte 60 Hz yenileme süresinde çalışabildiği ve böylece saniyede 60 kare görüntü işleyebildiği belirlenmiştir [41]. Bu durum sistemin gerçek zamanlı olarak çalışma şartını sağladığını göstermektedir.

Çizelge 1. Sistemin kaynak kullanım tablosu (System resource utilization table)

| Birim | Mevcut | Kullanılan | Kullanım Oranı (%) |
|------------------|--------|------------|--------------------|
| Toplam LUT | 53200 | 18646 | 35,05 |
| Mantıksal LUT | 53200 | 17446 | 32,79 |
| Hafıza LUT | 17400 | 1200 | 6,90 |
| Toplam Flip-Flop | 106400 | 24336 | 22,87 |
| Blok Hafıza | 140 | 35 | 25,00 |
| Blok DSP | 220 | 29 | 13,18 |

**Şekil 17.** Sistem Yazılımı Akış Şeması (System Software Flow Chart)

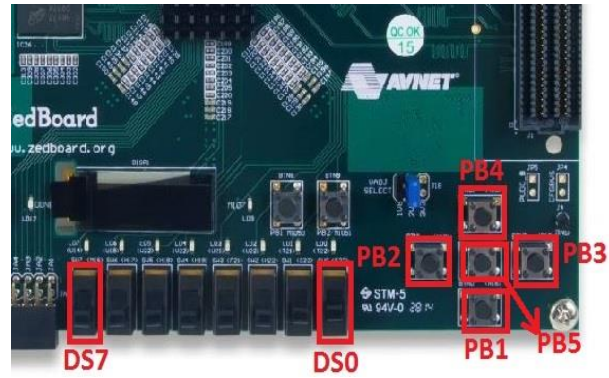
4.2. Sistem Yazılımının Gerçeklenmesi

(Implementation of the System Software)

Donanım tasarımının ardından sistem yazılımı donanıma uygun olarak tasarlanmıştır. Tasarım Vivado Suite içerisindeki SDK aracı kullanılarak C dilinde gerçekleştirilmiştir. Yazılımda kullanılan IP bloklarının hazırlanması ve çalıştırılması, giriş-çıkış birimlerinin ayarlanması gibi işlemler yanında filtre parametreleri de ayarlanmıştır. Geliştirilen sistemde filtreler çalışma anında değiştirilebilmekte ve birden fazla filtre aynı anda aktif olabilmektedir. Sistemin kontrolü Zedboard üzerindeki buton ve anahtarlar ile yapılmaktadır. Filtrelerin aktiflik durumu yine Zedboard üzerindeki ledlerden izlenebilmektedir.

Sistem yazılımının akış şeması Şekil 17.de verilmiştir. Ana program döngüsünde filtre seçimi yapılan sistem çalışmaktadır. Burada çoklayıcı mantığı kullanılarak zedboard üzerindeki anahtarların durumuna göre ilgili filtrenin seçimi yapılacak şekilde sistem tasarlanmıştır.

Şekil 18.de görülen Zedboard üzerindeki anahtarlardan DS0 en düşük değerlikli bit, DS7 ise en yüksek değerlikli bit olarak kabul edilerek anahtarların durumlarına göre ilgili filtreyi aktif edecek biçimde sistem tasarlanmıştır.

**Şekil 18.** Zedboard Üzerindeki Buton ve Led Kontroleri (Button and Led Controls on Zedboard)

4.3 Çalışmanın Önceki Çalışmalarla Karşılaştırması

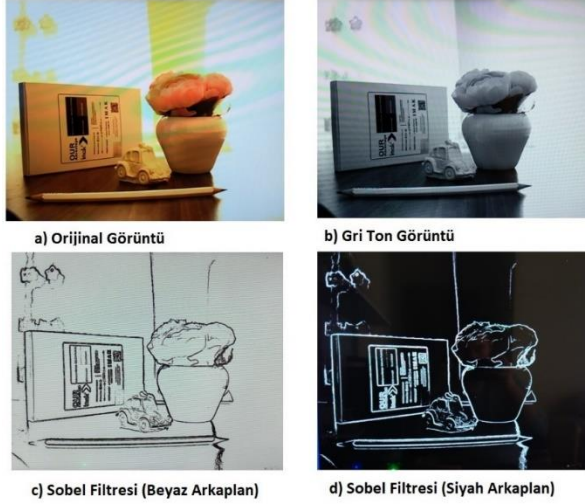
(Comparison With The Previous Works)

Yapılan çalışmanın ilgili çalışmalarda olan karşılaştırma tablosu Çizelge 2.de verilmiştir. Buna göre sistemler üzerinde kullanılan geliştirme kartları, görüntü boyutları ve kaynak kullanımları incelendiğinde çalışmada önerilen sistemin [11] numaralı çalışmaya göre performans olarak bariz biçimde üstün olduğu görülmüştür. Sistemin çözünürlüğü [6] numaralı çalışmaya göre daha düşük olmakla birlikte özellikle

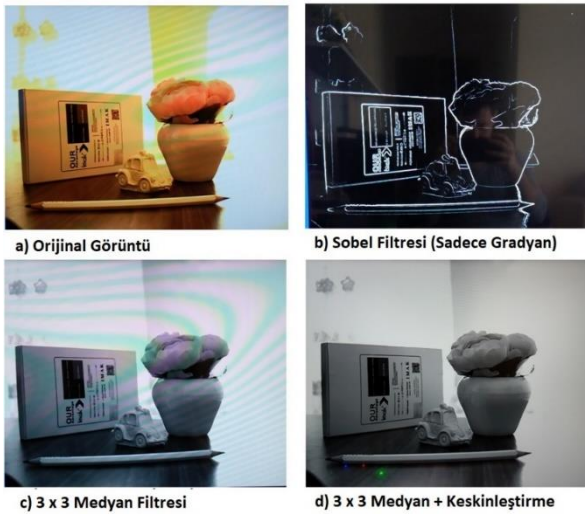
Çizelge 2. Sistemin diğer çalışmalarla olan karşılaştırma tablosu (Comparison table of the system with other studies)

| Yayın No. | Sistem Tanımı | Platform | Metot | Görüntü Boyutu | FPS | Blok Hafıza | Toplam LUT | Flip-Flop | LUT Kullanım Oranı (%) |
|-----------------|---|--------------------|------------|----------------|-----|-------------|------------|-----------|------------------------|
| [6] | Canny Kenar Bulma | Zynq-7000 ZC702 | Vivado HLS | 1920*1080 | 60 | 21 | 34129 | 26393 | 65 |
| [11] | Gri ton- Kenar Bulma ve Yumuşatma | Zynq-7000 Zedboard | HDL | 256*256 | 40 | 97,5 | 2648 | 3652 | 4,98 |
| Önerilen Sistem | Gri Ton-Kenar Bulma-Medyan-Keskinleştirme | Zynq-7000 Zedboard | HDL Coder | 1280*1024 | 60 | 35 | 18646 | 24336 | 35,05 |

önerilen sistemdeki blok hafıza kullanımının daha yüksek, ancak toplam LUT ve Flip-Flop kullanımının daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Önerilen sistemde 1080p çözünürlüğe çıkılamamasının sebebi kullanılan kameranın bu çözünürlüğü desteklemesidir. Sistemin çalışma görüntüleri Şekil 19 ve Şekil 20.de verilmiştir.



Şekil 19. Gri Ton ve Kenar Bulucu Sonucu (Grayscale Converter and Edge Detector Result)



Şekil 20. Kenar Bulucu, Medyan ve Keskinleştirme Sonucu (Edge Detector, Median and Sharpening Filter Result)

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada gerçek zamanlı bir görüntü işleme sistemi model tabanlı olarak tasarlanmış ve Zedboard geliştirme kartı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu tip sistemlerdeki yüksek işlem gücü ihtiyacı nedeniyle çalışmada kullanılmak üzere Zynq mimarisi seçilmiş ve hem donanım hem de yazılım tasarımı bu sistem üzerinde yapılmıştır. Sistemin donanım ve yazılım tasarımında Xilinx şirketinin Zynq uyumlu olarak geliştirdiği Vivado Suite ve buna bağlı araçlar kullanılmış, görüntü işleyici

sistemlerinin tasarımında ise Matlab/Simulink ve Mathworks şirketinin geliştirdiği HDL Coder, Vision HDL Toolbox gibi model tabanlı geliştirme araçları kullanılmıştır. Bu sayede elle HDL kodu yazımına gerek kalmamış tasarım süresi kısalmıştır. Çalışmada kullanılan Zedboard geliştirme kartı üzerinde 1280 x 1024 piksel çözünürlükte 60 Hz hızında çalışabilen bir sistem geliştirilmiştir. Sistemde uygulanan Sobel kenar bulma, ortanca filtre, gri ton dönüştürücü ve keskinleştirici filtre tasarımları kart üzerindeki giriş ve çıkış birimlerinden çalışma anında kontrol edilerek parametreleri değiştirilebilen esnek bir sistem ortaya konmuştur. Yapılan tasarımlar neticesinde sistemin ihtiyaçlara cevap verebildiği, gerçek zamanlı çalışma şartını yerine getirebildiği görülmüştür. Bununla birlikte kaynak kullanımının fazla yüksek olmadığı, ancak HDL Coder aracında ilgili en iyileştirmeler yapıldığı takdirde kullanımın daha da düşebileceği düşünülmektedir. Önerilen tasarım tamamen yeniden kullanılabilir olarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede daha ileri çalışmalarda ve farklı sistemlerde tasarlanan IP bloklarının ya da sistemin tamamının tekrar kullanılması mümkün olabilecektir. Gelecekteki çalışmalarda bu sistem ön işleme birimi olarak kullanarak daha gelişmiş gerçek zamanlı nesne tanıma ve takip uygulamalarının gerçekleştirilebileceği ön görülmektedir.

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

| | |
|-----------|---|
| AXI | Advanced eXtensible Interface (Gelişmiş genişletilebilir Arayüz) |
| DSP | Digital Signal Processing (Sayısal Sinyal İşleme) |
| FMC | FPGA Mezzanine Card (FPGA Ara Kartı) |
| FPGA | Field Programmable Gate Array (Alan Programlanabilir Kapı Dizisi) |
| FPS | Frames Per Second (Saniyedeki Kare Sayısı) |
| GPU | Graphics Processing Unit (Grafik İşleyici Ünite) |
| HDL | Hardware Description Language (Donanım Tanımlama Dili) |
| HDMI | High Definition Multimedia Interface (Yüksek Çözünürlüklü Çoklu ortam Arayüzü) |
| HLS | High Level Synthesis (Yüksek Seviyeli Sentez) |
| IP | Intellectual Property (Akıllı Özellik) |
| LUT | Look Up Table (Başvuru Çizelgesi) |
| RGB | Red Green Blue (Kırmızı Yeşil Mavi) |
| SDK | Software Development Kit (Yazılım Geliştirme Aracı) |
| SoC | System On - Chip (Yonga Üzeri Sistem) |
| VDMA | Video Direct Memory Access (Video Doğrudan Bellek Erişimi) |
| YUV/YCbCr | Luminance, Chrominance Blue, Chrominance Red (Parlaklık, Kırmızı Renklilik, Mavi Renklilik) |

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kahraman, E., Ünal, V., “Gerçek Zamanlı Gömülü Sistem ve Yazılım Tasarımı’nda ASELSAN Yaklaşımı”, *EMO - III. Ulusal Yazılım Mühendisliği Sempozyumu UYMS*, Ankara, (2007).
- [2] <http://processors.wiki.ti.com/index.php/DaVinci>, Erişim (01.10.2018)
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/OMAP>, Erişim (01.10.2018)
- [4] <https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/arm-based-processors-and-mcus/s32-automotive-platform/vision-processor-for-front-and-surround-view-camera-machine-learning-and-sensor-fusion-applications:S32V234>, Erişim (01.10.2018)
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_signal_processor, Erişim (01.10.2018)
- [6] Abdelgawad, H. M., Safar, M., ve Wahba, A. M., “High level synthesis of canny edge detection algorithm on Zynq platform”, *Int. J. Comput. Electr. Autom. Control Inf. Eng.*, 9(1): 148-152, (2015).
- [7] Crockett, L. H., Elliot, R. A., Enderwitz, M. A., & Stewart, R. W., “*The Zynq Book: Embedded Processing with the Arm Cortex-A9 on the Xilinx Zynq-7000 All Programmable Soc*”, **Strathclyde Academic Media**, 1st Edition, Glasgow, Scotland, UK. (2014).
- [8] Russell, M., Fischhaber, S., “OpenCV based road sign recognition on Zynq”, *Industrial Informatics (INDIN), 11th IEEE International Conference*, 596-601, (2013).
- [9] Monson, J., Wirthlin, M., ve Hutchings, B. L., “Implementing high-performance, low-power FPGA-based optical flow accelerators in C”, *Application-Specific Systems, Architectures and Processors (ASAP), IEEE 24th International Conference*, 363-369, (2013).
- [10] Sümer, Ö., “An Embedded Design And Implementation Of A Facial Expression Recognition System”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2014).
- [11] Altuncu, M. A., Güven, T., Becerikli, Y., ve Şahin, S., “Real-time system implementation for image processing with hardware/software co-design on the Xilinx Zynq platform”, *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 5(6): 473, (2015).
- [12] Chhabra, S., Jain, H., ve Saini, S., “FPGA based hardware implementation of automatic vehicle license plate detection system”, *Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), IEEE 2016 International Conference*, 1181-1187, (2016).
- [13] Shi, Z., “Rapid Prototyping of an FPGA-Based Video Processing System”, *Yüksek Lisans Tezi*, Virginia Tech - Virginia Polytechnic Institute and State University, Computer Engineering, Blacksburg, Virginia, (2016).
- [14] Al-Naqshbndi, S., “Hardware Acceleration of Computer Vision Application”, *Yüksek Lisans Tezi*, Delft University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Netherlands, (2016).
- [15] “HDMI Input/Output FMC Module with Camera Interface Hardware Guide”, Rev. 1.0, Avnet Inc., (2015).
- [16] “ON Semiconductor PYTHON 1300-C CAMERA MODULE Hardware User Guide”, Ver. 1.0, Avnet Inc., (2015).
- [17] <https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/fmc-cards.html>, Erişim (24.09.2018).
- [18] “Zedboard Hardware User’s Guide”, Ver. 7.0, Avnet Inc., (2014).
- [19] “Zynq-7000 All Programmable SoC Data Sheet: Overview (DS190)”, Ver. 1.11, Xilinx Inc., (2017).
- [20] “FMC-HDMI-CAM + PYTHON-1300-C Frame Buffer Design”, Ver. 2015.2, Avnet Inc., (2015).
- [21] “FMC-HDMI-CAM + PYTHON-1300-C Vivado HLS Reference Design”, Ver. 2015.4, Avnet Inc., (2016).
- [22] “HDL Coder Getting Started Guide”, version 3.11 R2017b, Mathworks Inc., (2017).
- [23] “Zynq-7000 All Programmable SoC Software Developers Guide (UG821)”, Ver. 12.0, Xilinx Inc., (2015).
- [24] “Xilinx Video and Image Processing Pack”, <https://www.xilinx.com/products/intellectual-property/ef-di-vid-img-ip-pack.html>, Erişim (11.05.2018).
- [25] “Avnet HDL Github Repository”, <https://github.com/Avnet/hdl/tree/master/IP>, Erişim (11.05.2018).
- [26] “Color Filter Array Interpolation v7.0 LogiCORE IP Product Guide (PG002)”, Xilinx Inc., (2015).
- [27] “Video On-Screen Display v6.0 LogiCORE IP Product Guide (PG010)”, Xilinx Inc., (2015).
- [28] “RGB to YCrCb Color-Space Converter v7.1 LogiCORE IP Product Guide. (PG013)”, Xilinx Inc., (2015).
- [29] “Video Timing Controller v6.1 LogiCORE IP Product Guide. (PG016)”, Xilinx Inc., (2017).
- [30] “Chroma Resampler v4.0 LogiCORE IP Product Guide. (PG012)”, Xilinx Inc., (2015).
- [31] “AXI Video Direct Memory Access v6.2 LogiCORE IP Product Guide. (PG020)”, Xilinx Inc., (2016).
- [32] “Matlab Online Documentation : Model Design for AXI4-Stream Video Interface Generation”, <https://www.mathworks.com/help/supportkg/xilinxzynq7000/ug/model-design-for-axi4-stream-video-interface-generation.html>, Erişim (11.05.2018).
- [33] “Matlab Online Documentation : Getting Started with AXI4-Stream Video Interface in Zynq Workflow”, https://www.mathworks.com/help/hdlcoder/examples/getting-started-with-axi4-stream-video-interface-in-zynq-workflow.html#hdlcoder_product_hdlcoder_ip_core_axi4_video, Erişim (11.05.2018).
- [34] “Matlab Online Documentation : Design Video Processing Algorithms for HDL in Simulink”, <https://www.mathworks.com/help/visionhdl/gs/design-video-processing-algorithms-for-hdl-in-simulink.html>, Erişim (11.05.2018).
- [35] “Matlab Online Documentation : Streaming Pixel Interface”, <https://www.mathworks.com/help/visionhdl/ug/streaming-g-pixel-interface.html>, Erişim (11.05.2018).
- [36] “Vision HDL Toolbox Reference”, version 1.5 R2017b, Mathworks Inc., (2017).
- [37] https://en.wikipedia.org/wiki/Rec._601, Erişim (25.09.2018)
- [38] <https://en.wikipedia.org/wiki/Grayscale>, Erişim (25.09.2018)
- [39] “Image Processing Toolbox Reference”, version 10.1 R2017b, Mathworks Inc., (2017).
- [40] “Display Timing Calculation For Fujitsu MB86R01 SoC”, <https://www.fujitsu.com/downloads/MICRO/fme/displaycontrollers/an-mb86r01-display-timing-calc-rev1-20.pdf>, Erişim (11.05.2018).
- [41] <http://www.epanorama.net/faq/vga2rgb/calc.html>, Erişim (26.09.2018)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Combustion properties of impregnated and heat-treated wood material

Emprenye edilmiş ve ısıtılmış ahşap malzemenin yanma özellikleri

Yazar(lar) (Author(s)): Osman PERÇİN¹, Musa ATAR²

ORCID¹: 0000-0003-0033-0918

ORCID²: 0000-0002-3944-5512

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Perçin O., Atar M., “Combustion properties of impregnated and heat-treated wood material”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 839-845, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.453808

Combustion Properties of Impregnated and Heat-Treated Wood Material

Research Article / Araştırma Makalesi

Osman PERÇİN^{1*}, Musa ATAR²

¹Necmettin Erbakan University, Faculty of Fine Arts, Department of Interior Architecture and Environmental Design, 42100, Konya, Turkey

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Wood Products Industry Engineering, 06500, Ankara/Turkey

(Geliş/Received : 15.08.2018; Kabul/Accepted : 19.10.2018)

ABSTRACT

The use of heat-treated wood material and eco-friendly impregnation chemicals are steadily increasing in the woodworking industry over the last decades. In this study, the effects of applications of impregnation and heat treatment on combustion properties of Hornbeam (*Carpinus betulus* L.) wood were investigated. The test specimens were impregnated with Imersol-aqua (Ia) and Timbercare-aqua (Ta) impregnation material according to ASTM D 1413-76 standards. Impregnated specimens were subjected to heat treatment at 150, 170 and 190 °C for 2 h. The temperature of flame source combustion, the temperature of without flame source combustion and varying light intensities (Lux) depending on the smoke production in these combustion stages were determined according to ASTM E 160-50. According to the test results, the highest combustion temperature of flame source combustion was determined in unimpregnated and heat-treated samples at 190 °C, while the highest combustion temperature of without flame source combustion was determined in impregnated with Ta and heat-treated samples at 170 °C. The highest light density in flame source combustion phase was determined in unimpregnated and heat-treated samples at 190°C, while in without flame source combustion was in unimpregnated and heat-treated samples at 170°C. As a result, as the heat treatment temperature increase, the combustion temperature increased and the smoke density decreased. In addition to impregnation materials increased the smoke density while reduced the combustion temperatures of test specimens.

Keywords: Heat treatment, imersol-aqua, timbercare-aqua, combustion, smoke production.

Emprenye Edilmiş ve Isıl İşlem Uygulanmış Ahşap Malzemenin Yanma Özellikleri

ÖZ

Son yıllarda ağaç işleri endüstrisinde ısıl işlem uygulanmış ağaç malzeme ve çevre dostu emprenye kimyasallarının kullanımı giderek artmaktadır. Bu çalışmada, emprenye ve ısıl işlem uygulamalarının Gürgeç (*Carpinus betulus* L.) ağacının yanma özelliklerine etkileri incelenmiştir. Deneysel örnekleri, Imersol-aqua (Ia) ve Timbercare-aqua (Ta) emprenye maddeleri ile ASTM D 1413-76 standardına göre emprenye edilmişlerdir. Emprenyeli örnekler 150, 170 ve 190 °C'de 2 saat ısıl işlem uygulanmıştır. Çalışmada alev kaynaklı yanma sıcaklığı, alev kaynaklı yanma sıcaklığı ve bu yanma aşamalarındaki duman üretimine bağlı olarak değişen ışık yoğunlukları (Lux) ASTM E 160-50 standardına göre belirlenmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek alev kaynaklı yanma sıcaklığı, emprenye edilmemiş ve 190 °C'de ısıl işlem uygulanan örneklerde, en yüksek alev kaynaklı yanma sıcaklığı ise Ta ile emprenye edilen ve 170 °C'de ısıl işlem uygulanan örneklerde belirlenmiştir. Alev kaynaklı yanma aşamasında en yüksek ışık yoğunluğu emprenye edilmemiş ve 190°C'de ısıl işlem uygulanan örneklerde belirlenirken, alev kaynaklı yanma aşamasındaki en yüksek ışık yoğunluğu ise emprenye edilmemiş ve 170°C'de ısıl işlem uygulanan örneklerde belirlenmiştir. Sonuç olarak ısıl işlem sıcaklığının artmasıyla yanma sıcaklığı artarken, duman yoğunluğu azalmıştır. Ayrıca emprenye maddeleri test örneklerinin duman yoğunluğunu artırırken, yanma sıcaklığını azaltmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isıl işlem, imersol-aqua, timbercare-aqua, yanma, duman üretimi

1. INTRODUCTION

The wood and wood-based building sector is developing in recent years, in the world. Wood is a very suitable material for construction, because of its a number of advantages not found compared to other building material [1]. Wood is renewable, easily workable and eco-friendly material that is available globally and comparable in strength to modern structural materials. For these reasons it has been widely used in interior

architecture decorations for many years[2]. Despite all these positive features, the wood material has some undesirable characteristics, one of the most important of them, it has easy burning feature [3]. In order to reduce the burning properties and to improve safety of wood, it is treated with some fire-retardant chemical substances[4]. Combustion properties of wood material can not be completely prevented, but it is possible to make it fire resistant with some chemicals[5].

Atar et al. [6] studied the effects of varnishing after impregnation with boron compounds on the combustion

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : opercin@konya.edu.tr

properties of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. They reported that impregnation chemicals decreased while varnishes increased the combustion temperature wood. In another study, Keskin et al. [7] studied the effects of impregnation with borax, boric acid, imersol-aqua and timbercare-aqua on combustion properties of the laminated wood, manufactured from Oriental beech and poplar veneers bonded with two different adhesive. As a results of study boron compounds showed a decreasing impact on combustion properties of the laminated wood materials. In a similar study Fidan et al. [8] investigated the effect of impregnation materials and synthetic or water-based varnish on the combustion properties of wood (*Cedrus libani* A. Rich.) material. Yaşar et al. [9] determined the combustion characteristic of impregnated spruce (*Picea orientalis* L.) wood.

In order to improve the properties of wood materials, significant studies have been carried out in recent years, one of which is heat treatment. Heat treatment is an effective alternative method for improving wood properties with no use of chemical materials [10]. During heat-treatment the properties of wood are changed. Many researchers have studied effects of combustion properties of wood materials, however, knowledge about the combustion properties of heat-treated wood is very limited. It may be important to determine the burning properties of heat-treated wood material, due to the increased use of heat-treated wood materials.

Müllerová [11] studied that fire tests of heat-treated spruce and pine wood were determined according to ISO 5660. Heat-treated spruce wood reduce the smoke released comparing to control sample. Heat-treated pine shows increasing effect on smoke release. In addition to, heat-treated soft wood has decreased ignition time and heat release when burning. Percin [12] investigated the effects of borax and boric acid on the combustion properties of heat-treated and laminated veneer lumber manufactured from Anatolian black pine wood. He reported that boron compounds showed fire retarding effect on combustion properties of wood. Also heat treatment showed decreasing effect on combustion temperature of wood except for TFS phase and weight loss rate. Gašparik et al. [13] determined flammability properties of heat-treated and fire-retardant treated oak wood (*Quercus robur* L.) at 160, 180 and 210 °C. As result they reported that heat treatment did not show clear effect on combustion properties of wood. Weight loss and burning rate decreased with heat treatment temperature and as the heat temperature increased without fire retardant treatment, time to reach the maximum burning rate decreased.

Volatile and flammable gases during the burning process can be effect on combustion properties and spread of flame of wood material [14,15]. Thermally conditions effect on flame and combustion properties of wood [16]. During the heat treatment process volatile organic compounds releases and they increasing with heat treatment temperature [17], which are explained by the thermal degradation and oxidation of main chemical

compounds in wood material and closely related to the combustion properties of wood [18].

The use of heat-treated wood materials for interior and exterior elements in the woodworking industry have been increased in recent years [19]. Also environmentally friendly wood preservative chemicals play an important role in wood industry. Therefore, this study was performed to determine the impacts of heat treatment process after impregnation with Imersol-aqua and Timbercare-aqua on the combustion properties of the Hornbeam (*Carpinus betulus* L.) wood.

2. MATERIAL and METHOD

2.1. Materials

2.1.1. Wood material

The Hornbeam (*Carpinus betulus* L.) wood specimens from the Kütahya region in Turkey were used in this study. The moisture content of the boards ranged from 10-14% and density was 0.776 g/cm³. Hornbeam wood is commonly used in the forest products and furniture industries in Turkey. Wood materials randomly selected from timber supplier in Simav- Kütahya. The oversized boards were kept in same normal environmental conditions for approximately two months.

2.1.2. Impregnation Material

Impregnation process was performed with two different wood modifiers. Commercially produced Imersol-aqua (Ia) and Timbercare-aqua (Ta) were used as impregnation material in this study was supplied from Hemel company in Istanbul, Turkey. Ia and Ta are eco-friendly, nonflammable, odorless, fluent, water-based, completely soluble in water, non-corrosive material and they are available as a ready-to-use solution. The pH and density value of both chemicals are 7 and 1.03 g/cm³, respectively [20,21].

2.2. Method

2.2.1. Preparation of test samples and impregnation

The test and control samples were cut from the sapwood parts of air-dried Hornbeam (*Carpinus betulus* L.) wood with a dimension of 500 × 17 × 17 mm in the longitudinal, radial and tangential directions according to TS 2470 [22]. This stick samples were conditioned at 20°C ± 2°C temperature and 65% ± 3% relative humidity for four weeks. Then the samples were cut and planed into the size 13 × 13 × 76 mm for impregnation process. In the tests, totally 864 (3x4x3x24) samples were combusted (24 test samples in each group, 2 different impregnation material and control group, 3 different heat treatment temperature and unheated group and 3 groups in each test). Test samples with initial equilibrium moisture content around 12% were impregnated with solutions before heat treatment. The test samples were impregnated with Ia by dipping method for 24 hours and Ta by brushing method according to ASTM D-1413-99 [23]. The impregnation process with brush was applied twice at intervals of 5 hours.

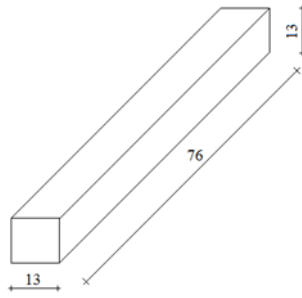


Figure 1. Combustion test sample and dimensions

2.2.2. Heat treatment

Test samples were subjected to heat treatment in a thermal oven under the protection of hot steam. Three final temperature 150, 170 and 190°C were chosen for the wood modification in this study. Heat treatment was applied in three phase. During the all heat treatment, hot steam was sprayed into the oven with 1 bar and time of 5 sec. at intervals of 200 sec. In the first phase, temperature of oven was raised to 100 °C for 6 hours and then the temperature was raised to 130 °C for 12 hours. In the second phase, the temperature raised from 130 °C to 150, 170, and 190 °C for 6 hours using steam. In this phase, temperature remains constant for 2 hours. In the final conditioning phase, the temperature was reduced to 25 °C for 12 h (Total treatment was 38 h). After heat treatment, the samples were conditioned at temperature of 20 ± 2°C temperature and a relative humidity of 65± 3% until reaching an equilibrium moisture content. Figure 2 shows heat treatment process.

2.2.3. Combustion test

In this study, to investigate the combustion properites of wood, the experiments were done in combustion test device according to ASTM E 160-50 [24]. Detailed information about the experiments and test device are given in this standard. The weights of the test samples were determined before each combustion test. The combustion tests were carried out subsequently according to standard. The flame source combustion (FSC) was continued for 180 s. After the flame source turned off and without flame source combustion (WFSC) was carried out. Temperatures in during combustion test were determined in °C buring column by a thermometer and the light density (Lux) was recorded by photocell

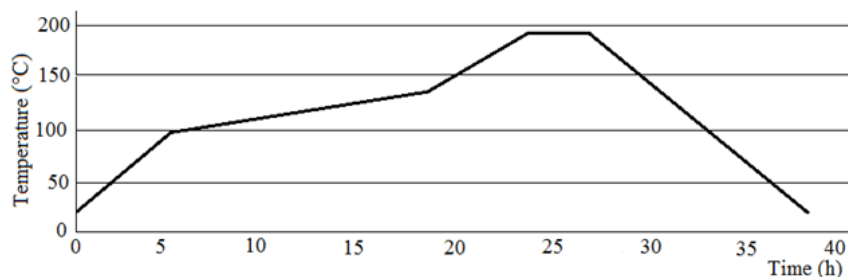


Figure 2. Heat treatment schedule (at 190°C)

detector. The light density changes depending on the smoke production and light density decreases with increasing smoke production. The combustion tests were carried out in combustion laboratory of Department of Furniture and Decoration Education, Faculty of Technical Education, Gazi University. The combustion test device shown in Figure 3 [9].

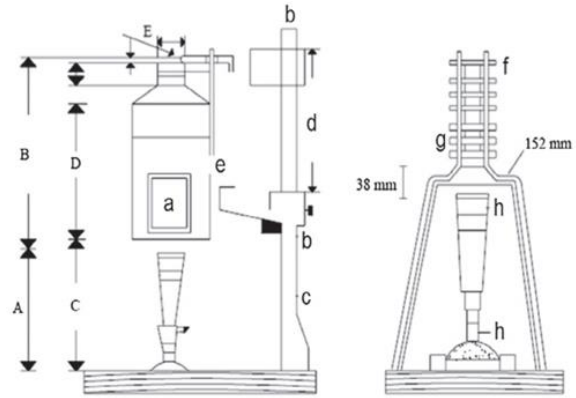


Figure 3. Combustion test device [9].

(a: mica glass, b: end of slide, c: flame burner guide, d: slide, e: millivoltmeter inlet, f: test specimens g. wire cage, h: flame burner)

2.2.4. Statistical analyses

In data analysis, in order to determine the effects of the impregnation material and heat treatment temperature and their mutual interactions on combustion properties, multiple analyses of variation (MANOVA) was used by MSTAT-C software package. If there is a significant difference between factor and their mutual interactions, Least Significant Difference (LSD) test was used to determine meaningful difference among the groups.

3. RESULT AND DISCUSSION

Table 1 shows the changes in air-dried density values of impregnated and then heat-treated samples. According to these results, after impregnation process the density values showed a small increase in the each test. In addition higher heat treatment temperature decreased density value of test samples. Impregnation with Ia and Ta solutions before heat treatment resulted in higher density values compared with the unimpregnated samples. The highest density was determined in the impregnated with Ta and unheated samples, while lowest in unimpregnated and at 190 °C heat-treated specimens.

Table 1. Density values of test specimens

| Treatments | | X (g/cm ³) | sd | N |
|---------------|----------|---------------------------|--------|----|
| Unimpregnated | Unheated | 0.776 ^B | 0.0119 | 20 |
| | 150 °C | 0.735 ^D | 0.0185 | 20 |
| | 170 °C | 0.703 ^F | 0.0140 | 20 |
| | 190 °C | 0.686 ^H | 0.0085 | 20 |
| Ia | Unheated | 0.787 ^A | 0.0114 | 20 |
| | 150 °C | 0.741 ^C | 0.0141 | 20 |
| | 170 °C | 0.713 ^E | 0.0211 | 20 |
| | 190 °C | 0.694 ^G | 0.0168 | 20 |
| Ta | Unheated | 0.791 ^A | 0.0115 | 20 |
| | 150 °C | 0.746 ^C | 0.0139 | 20 |
| | 170 °C | 0.715 ^E | 0.0168 | 20 |
| | 190 °C | 0.692 ^{FG} | 0.0124 | 20 |

HG: Homogenous groups, letters in each column indicate groups that are statistically different according to LSD multiple range test at $P < 0.05$. sd: Standard deviation; N: Number of samples. X: Average density

Results of tests showed that increasing temperature significantly reduced air-dried density, which this situation can be explained by the degradation of chemical components into volatile products and the evaporation of extractive materials due to heat treatment [25]. Yildiz [26] conducted research on heat-treated spruce (*Picea orientalis*) and beech (*Fagus orientalis*) woods, mentioned that heat-treated samples at 200 °C for 10 h. density decreased 10.53% and 18.37%, respectively. Thermal degradation of wood material depends on wood

species and process conditions such as treatment stage, treatment temperature and duration [27,28].

The results of the analysis of variance of the impregnation and heat treatment effects on temperature and light density of flame source combustion and without flame source combustion stages presented in Table 2.

According to the variance analysis, the effects of impregnation chemicals and heat treatment temperatures and the interaction of factors were found statically meaningful at 95 significance level on combustion

Table 2. Results of the analysis of variance

| Combustion properties | Source | Degrees of Freedom | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Sig. (P<0.05) |
|-----------------------|----------|--------------------|----------------|-------------|---------|---------------|
| Temperature of FSC | Factor A | 2 | 7742.000 | 3871.000 | 32.3707 | 0.0000 |
| | Factor B | 3 | 9364.750 | 3121.583 | 26.1038 | 0.0000 |
| | AxB | 6 | 1538.000 | 256.333 | 1.1436 | 0.0852* |
| | Error | 24 | 2870.000 | 119.583 | | |
| | Total | 35 | 21514.750 | | | |
| Temperature of WFSC | Factor A | 2 | 2440.500 | 1220.250 | 16.1623 | 0.0000 |
| | Factor B | 3 | 7506.750 | 2502.250 | 33.1423 | 0.0000 |
| | AxB | 6 | 1609.500 | 268.250 | 3.5530 | 0.0116 |
| | Error | 24 | 1812.000 | 75.500 | | |
| | Total | 35 | 12766.750 | | | |
| Light density in FSC | Factor A | 2 | 4387.722 | 2193.861 | 27.1873 | 0.0000 |
| | Factor B | 3 | 6198.083 | 2066.028 | 25.6031 | 0.0000 |
| | AxB | 6 | 513.167 | 85.528 | 1.0599 | 0.4132* |
| | Error | 24 | 1936.667 | 80.694 | | |
| | Total | 35 | 13035.639 | | | |
| Light density in WFSC | Factor A | 2 | 4335.167 | 2167.583 | 14.1160 | 0.0000 |
| | Factor B | 3 | 6414.889 | 2138.296 | 13.9252 | 0.0000 |
| | AxB | 6 | 1716.611 | 286.102 | 1.8632 | 0.1290* |
| | Error | 24 | 3685.333 | 153.556 | | |
| | Total | 35 | 16152.000 | | | |

*Statistically not significant (P<0.05); Factor A: Impregnation chemical; Factor B: Treatment temperature

properties except for temperature of FSC, light density in FSC, light density in WFSC.

170°C, respectively. The effect of heat treatment on combustion temperatures and light density were found to

Table 3. Average temperature and light density values of impregnation and heat treatment

| Process type | | Flame Source Combustion | | Without Flame Source Combustion | |
|-------------------------|---------------|-----------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|
| | | Combustion temperature (°C) | Light Density (Lux) | Combustion temperature (°C) | Light Density (Lux) |
| Impregnation Solutions* | Unimpregnated | 518 ^A | 455 ^A | 521 ^A | 443 ^A |
| | Ia | 486 ^B | 428 ^C | 501 ^C | 422 ^B |
| | Ta | 515 ^A | 446 ^B | 513 ^B | 418 ^B |
| Heat treatment** | Unheated | 484 ^C | 423 ^C | 489 ^C | 406 ^C |
| | 150 °C | 499 ^B | 440 ^B | 515 ^B | 427 ^B |
| | 170 °C | 521 ^A | 454 ^A | 529 ^A | 439 ^A |
| | 190 °C | 523 ^A | 456 ^A | 517 ^B | 441 ^A |
| LSD | | *9.063 | *7.445 | *7.201 | *10.27 |
| | | **10.47 | **8.597 | **8.315 | **11.86 |

The effect of impregnation materials on combustion temperatures and light density were found to be statistically insignificant ($\alpha < 0.05$). As seen from Table 3, a general reduction was showed in the temperature and light density values after combustion test in impregnation solutions, while a little increased the combustion temperature and light density values in heat treatment. In a similar research, Keskin [3] was impregnated LVL woods obtained from European oak (*Quercus petraea* Liebl.) and lombardy poplar (*Populus nigra* L.) with boron compounds, Ia, and Ta solutions. He reported that the treatment of wood samples with these chemicals caused significant improved to combustion properties compared to the unimpregnated samples. According to impregnation solutions the light intensity decreased due to the increase in smoke production in the stages of FSC and WFSC (Table 3).

On the other hand, the highest combustion temperature in the FSC and WFSC were determined at 190°C and at

be statistically insignificant ($\alpha < 0.05$). In general, combustion temperature increased with increasing heat treatment temperature. This may be due to on the decrease of equilibrium moisture content of heat-treated wood. It is well known that heat-treated wood has lower equilibrium moisture content compared to the unheated wood [29]. Also, light density increased with increasing heat treatment temperature. In other words, the smoke density of wood samples was reduced after the heat treatment. The highest smoke densities of FSC and WFSC stages were found on unheated wood.

Smoke production is an important factors for wood safety during the combustion in wood production industry [30]. Heat-treated test specimens have significantly decreased values of smoke density comparing to untreated specimens. This may be due to the removal of some volatile organic materials in the wood during the heat treatment. Müllerová [11] reported that wood material contains organic and inorganic matters and total volatile

Table 4. Duncan’s test results of interaction between impregnation material and heat treatment

| Impregnation Process | Heat Treatment | Flame Source Combustion | | Without Flame Source Combustion | |
|----------------------|----------------|-----------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|
| | | Combustion temperature (°C) | Light Density (Lux) | Combustion temperature (°C) | Light Density (Lux) |
| Unimpregnated | Unheated | 486 ^{FGH} | 436 ^{EF} | 506 ^E | 432 ^{BCD} |
| | 150 °C | 507 ^{CDE} | 452 ^{BCD} | 517 ^{CDE} | 443 ^{AB} |
| | 170 °C | 539 ^{AB} | 465 ^{AB} | 528 ^{ABC} | 457 ^A |
| | 190 °C | 543 ^A | 467 ^A | 535 ^{AB} | 441 ^{ABC} |
| Ia | Unheated | 469 ^H | 401 ^G | 475 ^E | 398 ^{EF} |
| | 150 °C | 479 ^{GH} | 425 ^F | 507 ^{DE} | 417 ^{DE} |
| | 170 °C | 491 ^{EFG} | 441 ^{DE} | 520 ^{BCD} | 428 ^{BCD} |
| | 190 °C | 506 ^{CDE} | 447 ^{CDE} | 503 ^E | 444 ^{AB} |
| Ta | Unheated | 498 ^{DEF} | 432 ^{EF} | 487 ^F | 389 ^F |
| | 150 °C | 511 ^{CD} | 443 ^{CDE} | 521 ^{BCD} | 421 ^{CD} |
| | 170 °C | 533 ^{AB} | 457 ^{ABC} | 539 ^A | 433 ^{BCD} |
| | 190 °C | 521 ^{BC} | 453 ^{ABCD} | 508 ^{DE} | 432 ^{BCD} |
| LSD | | 18.13 | 14.89 | 15.06 | 34.43 |

organic compounds decreased due to heat treatment. According to Manninen et al. [18] heat treatment releases volatile components from the wood material, which are closely related to the combustion properties of wood. For this reason, heat-treated wood contains lower volatile flammable components comparing to the un-heated wood [31].

The results of Table 4 demonstrated that the impregnation materials and heat treatment significantly affected combustion properties of the wood. In generally, temperatures of FSC lower than temperatures of WFSC. However light density of FSC higher compared to those of the WFSC. In FSC, Duncan's test results for the interaction of impregnation material and heat treatment was recorded as highest temperature with unimpregnated and heat-treated specimens at 190 °C (543°C) and lowest impregnated with Ia and unheated samples (469°C). In WFSC, highest temperature was measured as 539 °C in impregnated with Ta and heat-treated samples at 170 °C, while the lowest value as 475 °C in impregnated with Ia and unheated samples.

According to Table 4, in FSC, the highest light density was recorded as 467 Lux in unimpregnated and heat-treated specimens at 170 °C, the lowest as 401, in impregnated with Ia and unheated samples. In WFSC, the highest light density was recorded as 457 Lux in unimpregnated and heat-treated specimens at 190 °C, the lowest as 389 in impregnated with Ta and unheated samples.

The findings from Table 4 showed that in generally, impregnation material showed a decreasing effect on combustion temperature and light density. On the other hand, experimental results show that as the heat treatment temperature increases combustion temperature was increased, however meanwhile, smoke production was decreased in generally. In literature there are several studies that deal with the combustion properties of heat-treated wood. Xing and Li [32] studied combustion properties of heat-treated Larix wood. Test results showed that heat treatment showed positive effects on the fire safety of Larix wood, weakening the intensity of its combustion properties and also reducing the ignition time. Osvaldová and Gaff [33] determined retardation effect on heat-treated spruce wood. They reported that, heat-treated fire retardant treated samples have lower weight losses than non-treated samples. Yasar et al. (2017) [34] also reported that impregnation chemicals effects the combustion characteristics of wood material. In a similar study, Čekovská et al. [35] studied that higher heat treatment temperatures caused higher combustion rate on spruce specimens and burning stopped suddenly with the removal of the flame source during combustion. In another study, Budakçı et al. 2016 [36] studied that Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Oriental beech (*Fagus orientalis* L.) samples coated with waterbased varnish which was modified with 5% boric acid at varied amount (10%, 20%, and 30%) and then determined combustion properties of samples. According to the test

results, when increase the boric acid ratio in varnish the combustion resistance increased.

4. CONCLUSIONS

The combustion properties of impregnated and heat-treated hornbeam wood was determined in the study. The impregnation chemicals and heat treatment changed combustion temperatures and light densities of hornbeam wood. Combustion temperature of impregnated samples in the FSC stage was lower than unimpregnated samples and combustion temperature increased significantly as the heat treatment increased. In terms of light density in FSC stage, while impregnation materials caused higher smoke production, heat treatment decreased smoke production. In the WFSC stage, combustion temperatures of impregnated samples lower than those of the unimpregnated. In addition temperatures of heat-treated samples higher than unheated samples. In terms of light intensity, decrease values in the impregnated samples provided evidence increase of the smoke production were result of the impregnation process. The light density increased in heat-treated hornbeam samples depending on decreased smoke production. The combustion properties of impregnated and heat-treated wood should be further investigated.

REFERENCES

- [1] Bednarek Z. and Kaliszuk-Wietecka A., "Analysis of the fire-protection impregnation influence on wood strength", *Journal of Civil Engineering and Management*, 13(2): 79-85, (2007).
- [2] Lin C., "The application of wood in modern interior design", *The Open Construction and Building Technology Journal*, 9: 103-107, (2015).
- [3] Keskin H., "Effects of impregnation materials on combustion properties of laminated veneer lumber obtained from European oak (*Quercus petraea* Liebl.) and lombardy poplar (*Populus nigra* L.)", *Journal of Applied Polymer Science*, 105: 1766-1773, (2007).
- [4] Lowden L.A. and Hull T.R., "Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction", *Fire Science Reviews*, 2(4): 1-19, (2013).
- [5] Baysal E., "Combustion properties of wood impregnated with commercial fertilizers", *African Journal of Biotechnology*, 10(82): 19255-19260, (2011)..
- [6] Atar M., Döngel N. and Çınar H., "An analysis of varnish and impregnation processes for combustion temperature of scotch pine", *Materials Sciences and Applications*, 6: 78-85, (2015).
- [7] Keskin H., Atar M. and İzçiler M., "Impacts of impregnation chemicals on combustion properties of the laminated wood materials produced combination of beech and poplar veneers", *Construction and Building Materials*, 23(2): 634-643, (2009).
- [8] Fidan M.S., Yaşar Ş.Ş., Yaşar M., Atar M. and Alkan E., "Characterization of the Combustion parameters of impregnated and varnished cedar wood (*Cedrus libani*)", *Forest Products Journal*, 66(5-6): 290-299, (2016).
- [9] Yaşar Ş.Ş. Fidan M.S., Yaşar M., Atar M. and Alkan E., "Combustion properties of impregnated spruce (*Picea*

- orientalis* L.) wood”, *Construction and Building Materials*, 143: 574-579, (2017).
- [10] Johansson D., Heat treatment of solid wood. Effects on absorption, strength and colour, Ph.D Thesis. Luleå University of Technology, Division of Wood Physics, LTU Skellefteå. Sweden (2008).
- [11] Müllerová J., “Fire safety properties of heat treated wood”, *Research Journal of Recent Sciences*, 2(12): 80-82, (2013).
- [12] Percin O., “Impact of various chemicals on combustion properties of heat-treated and impregnated laminated veneer lumber (LVL)”, *Wood Research*, 60(5): 801-814, (2015).
- [13] Gašparik M., Osvaldová L.M., Čekovská H. and Potůček, D., “Flammability characteristics of thermally modified oak wood treated with a fire retardant”, *BioResources*, 12(4): 8451-8467, (2017).
- [14] Çolak S., Çolakoğlu G. and As N., “Comparing the burning of wood material with other building materials in case of fire”, *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, Serial: B, 52(1): 15-25, (2002).
- [15] LeVan S.L. and Winandy J.E., “Effects of fire retardant treatments on wood strength: A review”, *Wood and Fiber Science*, 22(1): 113-131, (1990).
- [16] Delichatsios M., Paroz B. and Bhargava A., “Flammability properties for charring materials”, *Fire Safety Journal*, 38(3): 219-228, (2003).
- [17] Wang Z., Sun B. and Liu J., “Investigation of volatile products released during vacuum heat treatment of larch wood”, *Wood Research*, 62(5): 773-782, (2017).
- [18] Manninen A-M., Pasanen P. and Holopainen J.K., “Comparing the VOC emissions between air-dried and heat-treated scots pine wood”, *Atmospheric Environment*, 36(11): 1763-1768, (2002).
- [19] Viitaniemi P., “New properties for thermally-treated wood”, *Indust Horizons*, March: 9-13, (2000).
- [20] Hemel, 2013a. http://www.hemel.com.tr/content/media/document/MSD_S-HEMEL-IMERSOL-AQUA-SDS10011-TR.pdf, 1-4 (13.04.2018).
- [21] Hemel, 2013b. http://www.hemel.com.tr/content/media/document/MSD_S-TIMBERCARE-AQUA-SDS10012-TR.pdf, 1-4 (13.04.2018).
- [22] TS 2470. Wood-sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. Institute of Turkish Standards, Ankara, Turkey, (1976).
- [23] ASTM-D 1413-76. Standard test methods of testing wood preservatives by laboratory soilblock cultures, Annual Book of Astm Standarts. USA, 452-460, (1976).
- [24] ASTM E 160-50. Standard test method for combustible properties of treated wood by the cribe test, ASTM Standards West Conshohocken, PA, USA, 809-813 (1975).
- [25] Esteves B.M. and Pereira H.M., “Wood modification by heat treatment: A review”, *BioResources*, 4(1): 370-404, (2009)..
- [26] Yildiz S., Physical, mechanical, technologic and chemical properties of *Fagus orientalis* and *Picea orientalis* wood treated by heating. Ph.D Thesis, Karadeniz Technical University, Institute of Science, Trabzon, Turkey, (2002).
- [27] Yildiz S., Gezer D. and Yildiz U., “Mechanical and chemical behaviour of spruce wood modified by heat”, *Building and Environment*, 41(12): 1762-176, (2006).
- [28] Korkut S., Korkut D.S., Kocaefe D., Elustondo D., Bajraktari A. and Çakıcıer, N., “Effect of thermal modification on the properties of narrowleaved ash and chestnut”, *Industrial Crops and Products*, 35(1): 287-294, (2012).
- [29] Li X., Cai Z., Mou Q., Wu Y. and Liu, Y., “Effects of heat treatment on some physical properties of Douglas fir (*Pseudotsuga Menziesii*) wood”, *Advanced Materials Research*, 197-198: 90-95, (2011).
- [30] Lee B.H., Kim H.S., Kim S., Kim H.J., Lee B., Deng Y., Feng Q. and Luo J., “Evaluating the flammability of wood-based panels and gypsum particleboard using a cone calorimeter”, *Construction and Building Materials*, 25(7): 3044-3050, (2011).
- [31] Martinka J., Chrebet T., Král J. and Balog K., “An examination of behaviour of thermally treated spruce wood under fire conditions”, *Wood Research*, 58(4): 599-606, (2013).
- [32] Xing D. and Li J., “Effects of heat treatment on thermal decomposition and combustion performance of *Larix spp.* wood”, *BioResources*, 9(3): 4274-4287, (2014).
- [33] Osvaldová L.M. and Gaff, M., “Retardation effect on thermally-modified spruce wood”, in Sustainable Development and Planning IX, Etd. Brebbia C. A., Longhurst J., Marco E., Booth C., WIT Transactions on Ecology and The environment 226: 537-546, (2017).
- [34] Yaşar S.S., Atar M., Yaşar M. and Fidan M.S., “The effects of outdoor conditions on the combustion properties of scotch pine (*Pinus Sylvestris* L.) wood”, *E.J. Engineering Sciences and Technology*, 1: 92-99, (2017).
- [35] Čekovská H., Gaff M., Osvald A., Kačík F., Kubš J. and Kaplan L., “Fire resistance of thermally modified spruce wood”, *BioResources*, 12(1): 947-959, (2017).
- [36] Budakçı M., Esen R., Özcan C., Korkmaz M. and Pelit H., “The effect of boric acid modification on the combustion properties of water-based varnish”, *Mugla Journal of Science and Technology*, 2(2): 204-210, (2016).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Karpal tünel sendromu temelli elektronik sağlık kayıt sisteminin geliştirilmesi

Development of electronic health record system based on carpal tunnel syndrome

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet İbrahim TALAN¹, Mehmet Rahmi CANAL², Veysel ALCAN³, Hilal KAYA⁴, Murat ZİNNUROĐLU⁵

ORCID¹: 0000-0002-3281-7205

ORCID²: 0000-0002-9942-3841

ORCID³: 0000-0002-7786-8591

ORCID⁴: 0000-0003-4787-105X

ORCID⁵: 0000-0003-1077-6753

Bu makaleye řu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Talan M.İ., Canal M.R., Alcan V., Kaya H. ve Zinnuroğlu M., "Karpal tünel sendromu temelli elektronik sağlık kayıt sisteminin geliştirilmesi", *Politeknik Dergisi*, 22(4): 847-853, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.453830

Karpal Tünel Sendromu Temelli Elektronik Sağlık Kayıt Sisteminin Geliştirilmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mehmet İbrahim TALAN¹, Mehmet Rahmi CANAL², Veysel ALCAN^{3*}, Hilal KAYA⁴, Murat ZİNNUROĞLU⁵

¹Bilişim Teknolojileri Alanı, M.E.B. Ankara Abidinpaşa MTAL, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, İnönü Üniversitesi, Türkiye

³Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Tarsus Üniversitesi, Türkiye

⁴Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye

⁵Tıp Fakültesi, Fiziksel Tıp ve Rehabilitasyon A.D, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 15.08.2018 ; Kabul/Accepted : 26.10.2018)

ÖZ

Karpal tünel sendromunun (KTS) tanısında, fiziksel muayene, klinik testler ve elektrofizyolojik yöntemler kullanılmaktadır. Fakat pratikte uygulanan klinik ve elektrofizyolojik testlerde klinik ve laboratuvarlar için bir standart bulunmamaktadır. Bundan dolayı Elektronik Sağlık Kaydı (ESK) sistemlerinde, veri parçalanması veya uyumsuzluklar meydana gelebilmektedir. Ayrıca bu ESK sistemlerinde, ikincil kullanım ve farklı biyomedikal araştırma hedefleri dikkate alınmamakta ve rutin dökümantasyon işlemi sırasında, eksik, hatalı, tutarsız veri girişleri ve hatalı kodlamaları yapılabilmektedir. Bu çalışma ile, KTS tanısında farklı klinik ve merkezlerce de kullanılabilir bir ESK sisteminin geliştirilmesi ve böylelikle standartlaştırılmış, kaliteli, öngörücü, önleyici, kişiselleştirilmiş ve gerçek zamanlı katılımcı bir KTS biyomedikal veri ambarının oluşturulması hedeflenmiştir. KTS tabanlı ESK sistemi, Microsoft Visual Studio C# programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Ayrıca; yeni hasta kaydı esnasında KTS ön tanısı için WEKA programı kullanılarak veri madenciliği yöntemine dayalı bir klinik karar destek sistemi (KKDS) ile desteklenmiştir. Geliştirilen ESK sistemi, klinik ve elektrofizyolojik test sonuçlarının yanısıra hassas tıp yaklaşımı çerçevesinde genetik ve çevresel varyantların da tek bir veri tabanına entegre edilmesine imkan tanımakta ve ikincil kullanım amacıyla geniş ölçekli doğru eksiksiz ve aynı standartta bir veri ambarı sunabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Karpal tünel sendromu, elektronik hasta kayıt sistemi, veri ambarı, klinik karar destek sistemi.

Development of Electronic Health Record System Based on Carpal Tunnel Syndrome

ABSTRACT

Physical examination, clinical tests and electrophysiological methods are used in the diagnosis of carpal tunnel syndrome (CTS). However, in practice there are no standard clinical and electrophysiological tests for clinics and laboratories. Therefore, data fragmentation or incompatibilities may occur in Electronic Health Record (EHR) systems. Furthermore, secondary use and different biomedical research targets are not considered in these EHR systems. During routine documentation, incomplete, incorrect, inconsistent data entry and incorrect coding can be done. This study aimed to develop an EHR system that could be used in different clinics and centers in diagnosis of CTS, thus creating a standardized, high quality, predictive, preventive, personalized and real-time participatory CTS biomedical data warehouse. The CTS-based EHR system was developed using Microsoft Visual Studio C # programming language. Also during a new patient record, the system was supported by a clinical decision support system (CDSS) based on the data mining methods using WEKA program for pre-diagnosis of the CTS. This EHR system also allows clinical and electrophysiological test results as well as genetic and environmental variants to be integrated into a single database within the framework of precision medicine approachment. In addition, this system can provide a large scale accurate and complete data warehouse for secondary use purposes.

Keywords: Carpal tunnel syndrome, electronic health record system, data warehouse, clinical decision support system.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Karpal tünel sendromu (KTS), median sinirin el bileğinde karpal tünelde kompresyonu sonucu çok yaygın şekilde görülen bir tuzak nöropatidir. KTS'nin prevalansı genel popülasyonda %0.6- 3.4'tür [1]. İnsidans ise 100000 kişide 330-346 yeni vakadır [2]. KTS'nin prevalansı ve insidansı; yaş, cinsiyet, meslek, mevsim, hamilelik, obezite, diyabetik, vücut kitle indeksi ve diğer genetik faktörler gibi unsurlara bağlı olarak

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : alcan@tarsus.edu.tr

değişebilmektedir. KTS'nin tanısında, fiziksel muayene, klinik testler ve elektrofizyolojik yöntemler kullanılmaktadır. Fiziksel muayenede provakatif test veya testler uygulanarak klinik belirti ve bulgular elde edilir. Tinel işareti, phalen (bilek fleksiyon) testi, Boston anketi (septom şiddeti skalası ve fonksiyonel kapasite skalası), ters phalen testi, karpal kompresyon testi, iskemik (turnike) testi, bilek fleksiyon ve karpal kompresyon testleri, yaygın olarak kullanılan provakatif testlerdir [3-6]. Elektrofizyolojik yöntemlerde ise median, motor ve ulnar sinir ileti çalışmaları (NCSs), H

refleks, F dalgası gibi elektromiyografiye (EMG) dayalı tanılayıcı testler uygulanmaktadır [7,8]. Fakat pratikte uygulanan provakatif klinik testlerde ve EMG'ye dayalı NCS testlerinde klinik ve laboratuvarlar için bir standart bulunmamaktadır [9,10]. Bundan dolayı farklı merkezlerce KTS verilerinin girildiği ve arşivlendiği Elektronik Sağlık Kayıt (ESK) sistemlerinde, veri parçalanması veya uyumsuzluklar meydana gelebilmektedir. Ayrıca; bu ESK sistemlerinde, ikincil kullanım veya farklı biyomedikal araştırma hedefleri dikkate alınmamakta ve rutin dökümantasyon işlemi sırasında, eksik, hatalı, tutarsız veri girişleri ve hatalı kodlamalar yapılabilmektedir. Özellikle teşhis, ölçüm veya tıbbi öykü gibi doğal dilde serbest metin girişinin yapıldığı bölümler, standartlaştırılmamış veya yapılandırılmamış bilgileri, uyumsuz tıbbi terim ve kısaltmaları içerebilmektedir. Bundan dolayı, farklı hastane ve merkezlerde uygulanan birbiri ile uyumsuz ESK sistemlerinin, tek bir veri tabanına entegre edilmesi ve bir veri ambarının meydana getirilmesi problem oluşturabilmektedir [11]. Son yıllarda “nesnelerin interneti (IoT)” ve “büyük veri (big data)” analizine dayalı çalışmalarda, özellikle tıp alanında da büyük veri ambarlarının giderek etkisini hissettirdiği görülmektedir [12-15]. Fakat ESK sistemlerindeki verilerin, kalitesiz, eksik, bozulmuş, hatalı ve farklı standartlarda olması, bu araştırmalar için büyük zorluklar sunmaktadır [16-20].

Geliştirilen bu sistem ile doğal dilde serbest metin şeklinde veri girilmesi yerine Hastalıkların Uluslararası

Sınıflaması (ICD) kodları temel alınarak bilgisayar aracılığı ile listelenmiş seçim ekranlarından veri girişi sağlanarak standartlaştırılmış kaliteli bir KTS veri ambarının oluşturulmasına katkı sağlanabilmektedir. Ayrıca, ikincil kullanım amaçları ve hassas tıp paradigması göz önüne alınarak hastalığın tanı ve sınıflandırılmasında klinik ve elektrofizyolojik ölçüm sonuçları ile birlikte anatomik, genetik ve kişisel verilerinde aynı standart ve kalitede saklanması hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada Yazılım geliştirmeden önce hâlihazırda kullanılan ESK sisteminin yazılım ve donanım fizibilitesinin yanı sıra yasal durum ve mevzuatlar incelenmiştir. Daha sonra gerçek sorun ve olası çözümler için doktor ve teknisyenler ile görüşmeler yapılmış ve bu hâlihazırda klinik uygulamalarda son kullanıcılar ile birlikte beyin fırtınası gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yazılım için ihtiyaç analizi yapılarak sistemin mevcut sistemler ile çalışabilirlik ihtiyaç ve kısıtları belirlenmiş, alternatif çözümler, maliyet ve performans karşılaştırmaları yapılmıştır. KTS tabanlı ESK sisteminin geliştirilmesinde, Microsoft Visual Studio 2013 ortamında C# programlama dili kullanılmıştır. Veri tabanı işlemleri ise Microsoft Access yazılımı ile geliştirilmiştir. Şekil 1'de yazılımın mimarisi gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışmanın yazılım mimarisi (The software architecture of this study)

Şekil 2'de geliştirilen ESK sistemine ait ana menü blokları ve bu menü altında gerçekleştirilen işlemler gösterilmiştir. ESK sistemindeki içerik ve açıklamaların kalitesini doğrulamak ve değerlendirmek için uzmanlardan destek alınmıştır. Kayıtlı kullanıcı girişi ile giriş ekranındaki üç menü butonu aktif olmaktadır. Hasta kayıt ekranında mümkün olan en iyi işlevselliği sağlamak için klavye geçişleri düzenlenmiştir. Kullanıcılar, çalıştıkları bir pencereden uzaklaşmak zorunda kalmadan ilgili bilgileri görüntüleyebilmektedirler. ESK sistemi,

veri tabanlarının oluşturulması ve arşivlemesinde iki veri tabanı dosyası üzerinde işlem yapmaktadır. İlk veri tabanı, veri madenciliği sınıflandırma modeli Naive Bayes algoritmasının çalışması için gerekli olan statik yapıdaki veri ambarıdır. İkinci veri tabanı ise hasta bilgi tablosu, EMG tablosu, iğne EMG tablosu ve personel bilgi tablosu olmak üzere dört tablodan oluşturulmuştur.

| Yeni Hasta İşlemleri | Kayıtlı Hasta İşlemleri | Ayarlar Bölümü |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Kişisel bilgilerinin girilmesi • Hasta şikâyetlerinin girilmesi • Hasta öyküsünün girilmesi • Hasta tıbbi geçmişinin girilmesi • Veri madenciliği ile ön tanı işlemi • Ön tanının girilmesi | <ul style="list-style-type: none"> • Hasta listesinin görüntülenmesi ve arama yapılması • Hasta bilgilerinin ve önceki NCSs sonuçlarının görüntülenmesi • NCS test sonuçlarının girilmesi • İğne EMG sonuçlarının girilmesi • Boston Testi ve Fonksiyon Skalası Testi • El şemasının işaretlenmesi ve puanlandırılması • Hastaya ait rapor alınması • NCSs ve iğne EMG ölçümlerine ait rapor alınması | <ul style="list-style-type: none"> • Yeni kullanıcı ekleme • Kullanıcı silme • Güncelleme |

Şekil 2. KTS tabanlı ESK sistemine ait ana menü ve işlevleri (Main menu and functions of CTS-based EHR system)

Hastalara ait oluşturulan raporlar, el şemaları ve NCS-EMG dosyaları bilgisayarın C dizini altında Emg_Verileri, Raporlar ve El adında üç klasörle arşivlenmektedir. Her bir hastanın EMG dosyaları kendi isimlerine yönelik bir alt klasör içine kopyalanmaktadır. Geliştirilen bu sistem, klinikte rutin hasta muayeneleri sırasında son kullanıcı olan hekim ve klinik teknisyenleri tarafından test edilmiştir. Yazılımın kullanılabilirliğini,

öğrenilebilirliğini ve son kullanıcı için ne kadar uygun olduğu yani arayüzün kullanıcı dostu (user-friendly) olup olmadığını geri bildirim testleri ile ölçülmüştür.

Yeni hasta kaydı esnasında hasta şikâyetleri esas alınarak KTS ön tanısı için veri madenciliği yöntemi kullanılarak bir klinik karar destek sistemi (KKDS) geliştirilmiştir. Veri madenciliğinde yaygın olarak kullanılan Naive Bayes, J48, Id3, k-en yakın komşu (IBk) algoritması ve Multilayer Perceptron sınıflandırma algoritmalarının başarımları testleri, WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis software developed by the University of Waikato, New Zealand) yazılımı aracılığıyla karşılaştırılarak en iyi sonucu veren algoritmanın Naive Bayes algoritması olduğu tespit edilmiştir [21].

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Geliştirilen ESK sistemi menu ekranında, standart bir kayıt ve takibin yapılabilmesi amacıyla KTS ile ilişkili pek çok faktör veri tabanına kaydedilmektedir. Şekil 3'te yeni hasta kaydının alınmasına ait ESK menüsü gösterilmiştir.

Şekil 3. Yeni hasta kaydının yapıldığı alt menüye ait ekran görüntüsü (Screenshot of the submenu on which the new patient record is made)

Veri madenciliği tahmin butonu ile yeni bir hastanın tıbbi şikâyeti, gece şikâyeti, güçsüzlük, karıncalanma ve uyuşukluk şikâyeti, kliniğe başvuru mevsimi, yaş ve cinsiyet verileri kullanılarak veri madenciliği sınıflandırma modeli ile kişinin hastalık tahmini gerçekleştirilmektedir. Bu tahmin işlemi, sağ ve sol el için ayrı ayrı sonuç üretir. Böylelikle, klinik muayene sırasında doktorlar için bir KKDS sağlanmıştır [21].

Kayıtlı hastaların görüntülenmesine ait menu Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu ekranda kayıtlı olan tüm hastaların listesi bulunmaktadır. Liste üzerinde arama yapılarak

istenilen hastaya ait bilgiler görüntülenebilir, bilgi girişi yapılabilir veya düzenlenebilir. Şekil 4'teki ekranda bulunan Bilgi-Rapor butonu ile açılan ekranda, kayıt edilmiş hastanın kişisel bilgileri, şikâyetleri, öyküsü, ön tanısı, veri madenciliği algoritmasının hastalık sınıflandırması, daha önceden yapılmış ve kayıt edilmiş EMG ölçüm tarihleri ve değerleri görülebilir.

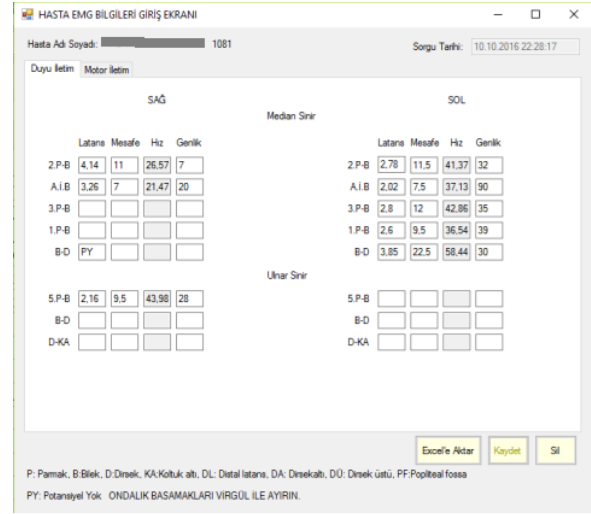


Şekil 4. Kayıtlı hastalar için bilgi ekranı resmi (The picture of the information screen for registered patients)

Hasta bilgileri, bu ekran aracılığıyla güncellenir. EMG butonuna basılarak açılan EMG ekranından hastaya ait “.txt” uzantılı dosyalar programa yüklenir. Bu ekran ile grafikler görüntülenebilir, grafikleri oluşturan .txt dosyaları hasta bazında kaydedilebilir ve daha önce kaydedilen dosyaları açılarak eski grafikleri görüntülenebilir.

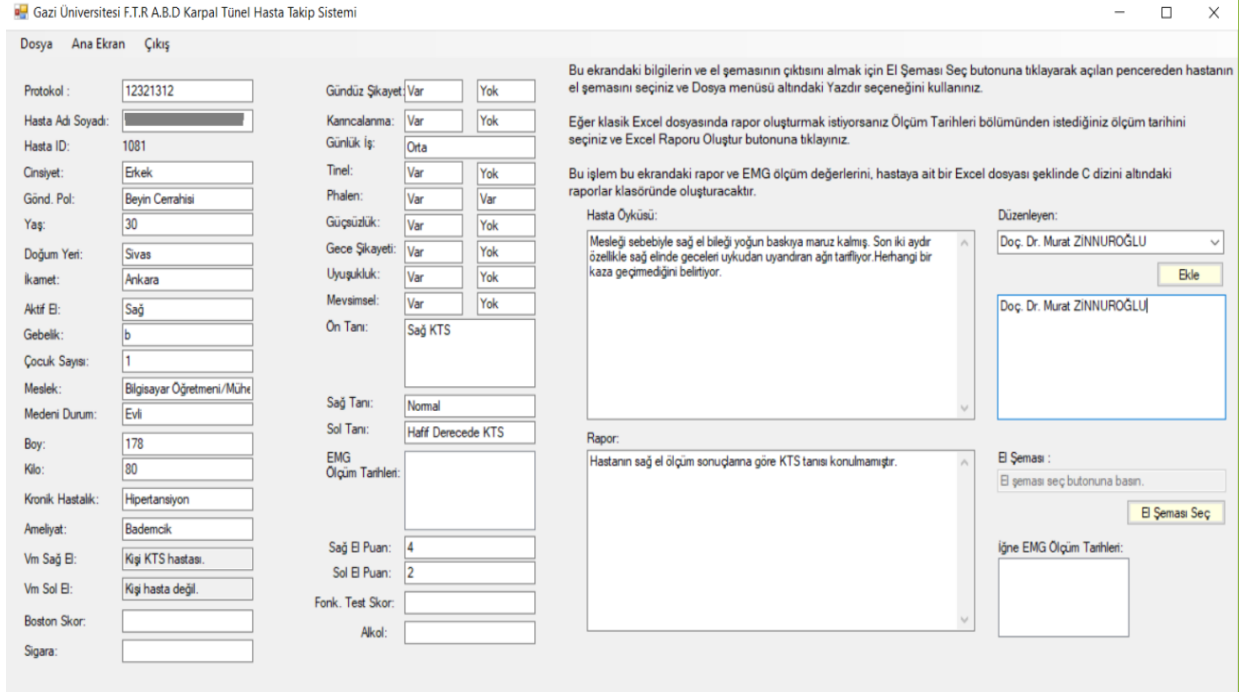
Hastanın NCSs test sonuçlarını sisteme girmek için Şekil 3’teki ekranda bulunan EMG Gir butonu ile açılan ekran, Şekil 5’te gösterilmiştir. Bu ekranda hastaların sağ ve sol ellerine ait median ve ulnar ulnar sinirlerine ait duyu ve motor NCSs değerleri girilerek kaydedilebilir. Hız değeri program tarafından otomatik hesaplanmaktadır.

Şekil 6’da sağ ve sol el ayrı ayrı olmak üzere doktor, hasta için son tanısını ve rapor bilgilerini girerek klinik takip işlemini tamamlar. Hastanın NCSs ve iğne EMG ölçüm bilgilerine de bu ekrandan ulaşılabilir.



Şekil 5. NCS bilgileri için kayıt ekranı resmi (The picture of the recording screen for NCS information)

Görüntülenen NCSs ve iğne EMG bilgileri, Dosya menüsü altındaki Excel raporu oluştur seçeneğiyle standart bir rapor formatında Excel dosyası olarak hasta adı ve tarih bilgisiyile bilgisayara kayıt edilebilir. Hastaya iğne EMG işlemi yapıldığı durumlarda iğne EMG ölçümüne ait değerler, Şekil 7’deki ekranda yer alan İğne EMG butonuyla açılan pencereden kayıt altına alınabilir



Şekil 6. Hasta bilgilerini görüntüleme, güncelleme, tanı ve rapor girişi için ekran görüntüsü (The Picture of screen for displaying, updating, diagnosing, and reporting of patient information)

Şekil 7. İğne EMG ölçüm sonuçları için giriş ekran görüntüsü (The picture of Input screen for needle EMG measurement results)

Şekil 4'deki Boston Testi butonuyla açılan ekranda, kayıtlı hastalar için Boston testi ve fonksiyon kapasite skalası testi uygulanabilir ve işlem sonunda test puanları kayıt edilir. Şekil 8'de gösterilen Boston testi, 11 soru ve 5 şıktan oluşan karpal tünel sendromunun semptomlarının hangi derecede olduğunu anlamaya çalışan bir testtir. [10]. Fonksiyonel kapasite testi ise hastanın el fonksiyonlarının kapasitesinin seviyesini gösterir ve 8 soru ve her soruya ait 5 şıktan oluşur. [10].

Şekil 8. Boston testi ekranı (The screen of Boston test)

Hastaların şikâyetlerinin ellerinin hangi bölgelerinde olduğunu tam olarak gösterebilmeleri için Şekil 3'teki ekranda El şeması butonuyla açılan Şekil 9'daki ekranı kullanabilirler. Bu ekranda yer alan el şemaları ile hastalar, parestezi tanımladıkları bölgeleri işaretleyebilirler. Program median sinirin etkilediği her bölgeye 1 puan verir. İşaretleme bitiminde hem sağ hem de sol el için toplam puan hesaplanarak kayıt edilir. Programın bu ekranı ile her hastaya ait el şeması, tarih ve hasta adı bilgileriyle birlikte kayıt edilebilir.

Şekil 9. Boston testi ekranı (The screen of Boston test)

Bu çalışmada geliştirilen KTS tabanlı ESK sistemi, klinik ve elektrofizyolojik test sonuçlarının yanısıra cinsiyet, yaş, medeni durum, dominant el, mevsim, meslek, gebelik, uyuşukluk, karıncalanma, çocuk sayısı, kilo, boy, kronik hastalık, alkol, sigara ve obezite gibi genetik ve çevresel varyantların da tek bir veri tabanına entegre edilmesine imkan tanımaktadır. Çünkü araştırmalar genetik varyantların bireyin karpal tünel sendromundan muzdarip olma ihtimalini artırdığını rapor etmektedir [22-27]. Bu çalışmada önerdiğimiz yapılandırılmış ve standardize edilmiş kişisel, çevresel, genetik ve klinik bilgilere dayalı veri çalışmaları, KTS için epidemiyolojik kanıtları geliştirmenin yanısıra hassas tıp paradigmasının yaygınlaştırılmasında oldukça önem teşkil edebilir [28]. Bu yaklaşımda, hastalık süreçlerini daha iyi tanımlamak ve sınıflandırmak için ESK sistemlerindeki hasta verilerine ek olarak tıbbi koşullar, altta yatan genetik faktörler, ilaçlar ve tedavi yaklaşımları hakkında da oldukça fazla verinin aynı standartta ve kalitede paylaşılması büyük önem arz etmektedir [28-30]. Eğer ESK'lerde bulunana tanı, ölçüm veya tıbbi öykü standartlaştırılmamışsa yada yapısal formda

bulunmadıklarından dolayı yetersiz kalırsa, veritabanı içeriği ikincil kullanımlar için yetersiz olabilir [31].

ESK tabanlı araştırmalar; hasta bakımını iyileştirmeyi, kişiselleştirilmiş bakımı kolaylaştırmayı, kontrollü çalışmalar yerine “gerçek dünya” ortamında araştırma yapmayı, KKDS geliştirmeyi ve yeni bulgu ve bilgiler elde etmeyi hedeflemektedir [32-34]. Bu çalışmada da, daha doğru bir ön tanı için veri madenciliği yöntemi kullanılarak bir KKDS geliştirilmiştir. Veri madenciliği yönteminin başarımlarını, rutin kullanılan ESK sistemlerinden retrospektif olarak alınmış hasta verileri ile test edilmiş ve KTS ön tanısında rutin yöntemlere göre daha başarılı olduğu görülmüştür [21]. Geliştirilen ESK sistemindeki diğer kişisel, çevresel ve genetik bilgiler ile ön tanıdaki doğruluk oranının, prospektif çalışmalarda daha da yüksek bir orana çıkması beklenmektedir.

ESK verileriyle bağlantılı olabilecek diğer potansiyel uygulama alanları, Mobil sistemler, bulut sistemler ve web-tabanlı sistemlerdir. Aynı standart ve kalitede veri girişlerinin yapıldığı ESK sistemlerinin internete bağlanması sonucunda milyonlarca hasta verisini içerecek büyük veri ambarı ile IoT uygulamalarının etkinliği artacaktır. Fakat, hastaların demografik özellikleri, tıbbi geçmişi, tedavi ve laboratuvar test sonuçlarından oluşacak bu muazzam dijital formattaki sağlık bilgilerinin gizliliği ve güvenliği için yasal korumaya ihtiyaç olacaktır. Veri araştırması, veri güvenliği veya veri ihlalden dolayı bu yasal korumalardan her birisi tanımlanabilirlik için çeşitli standartları karşılayan verileri kullanabilecektir [35,36].

Geliştirilen ESK sisteminde, birlikte çalışabilirlik, veri yakalama, veri çıkarma yetenekleri ve sistem kullanılabilirliğini artırmak sadece teknolojik gelişmelere değil aynı zamanda sürekli insan çabasına da bağlı olacaktır. Bundan dolayı, klinisyenler, doktorlar ve hastalar tarafından ESK sistemlerinin ikincil kullanımı göz önünde bulundurularak, araştırmacıların çalışma tasarımı, analizi ve yayını konusunda titiz davranmaları gerekmektedir. Böylelikle, ESK sistem teknolojisi olgunlaştıkça doğru ve kapsamlı veri ambarlarını yakalama kapasitesi iyileşmeye devam edecektir.

Geliştirilen bu sistemde hastanın sözel ifadesi doğrultusunda klavye ile giriş sağlanan öykü ve kronik rahatsızlık gibi doğrudan veri girişleri mevcuttur. Bu kısımda doğal dil işleme araçları kullanılarak hastaların kendi ifadelerinden yapılandırılmış veriler elde edilebilir veya düz metin olarak girilen bilgilerden “metin madenciliği” yöntemi uygulanarak kullanışlı bilgiler elde edilebilir. Ayrıca ESK sisteminde kaydedilen tanılayıcı testlerin dışında KTS tanısında kullanılan diğer tanılayıcı indeksler için de veri girişi sağlanabilir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

KTS tabanlı ortak bir ESK sistemi, ikincil kullanım amacıyla araştırmacılara yönelik geniş ölçekli doğru eksiksiz ve aynı standartta bir veri ambarı sunacaktır. Böylelikle, verilerin yanlış yorumlanması, veri bozulmaları, hatalı çalışma ve araştırma sonuçları gibi

sorunları önleyecektir. Gelecek çalışmalar için KTS tanısında halihazırda altın standart olarak kabul edilen duyu ve motor medyan ve ulnar sinir ileti çalışmalarına ait elektrofizyolojik test sonuçları, klinik testler, hastalık öyküsünde çıkarılan kullanışlı bilgi, hassas tıp paradigması hedeflenerek yaş, cinsiyet, sigara alkol, medeni durum ve gebelik gibi genetik ve anatomik veriler gibi değişkenler makine öğrenmesi ve yapay zeka algoritmaları için giriş değişkenleri olarak kullanılabilir. Böylelikle, hastalık tanı ve tedavi planlamasında daha yüksek doğruluk, hassasiyet ve seçiciliğe sahip KKDS sağlanmış olur. Ayrıca, yapılandırılmış kaliteli bir veri ambarı sayesinde büyük veri çalışmalarına imkân sağlanabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

EKS sisteminin geliştirilmesi ve test sürecinde verdikleri desteklerden dolayı Gazi Üniversitesi Tıp Fakültesi Fiziksel Tıp ve Rehabilitasyon A.D EMG Kliniği'nde çalışan tüm personele teşekkür ediyoruz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Atroshi I., Gummesson C., Johnsson R., Ornstein E., Ranstam J. Rosen I., “Prevalence of carpal tunnel syndrome in a general population”, *JAMA*, 282: 153-158, (1999).
- [2] Nordstrom D.L., DeStefano F., Vierkant R.A., Layde P.M., “Incidence of diagnosed carpal tunnel syndrome in a general population”, *Epidemiology*, 9: 342-345, (1998).
- [3] Ghavanini M.R., Haghghat M., “Carpal tunnel syndrome: reappraisal of five clinical tests”, *Electromyogr Clin Neurophysiol*, 38: 437-441, (1998).
- [4] Gellman H., Gelberman R.H., Tan A.M., Botte M.J., “Carpal tunnel syndrome. An evaluation of the provocative diagnostic tests”, *J Bone Joint Surg Am*, 68: 735-757, (1986).
- [5] Tetro A.M., Evanoff B.A., Hollstien S.B., Gelberman R.H., “A new provocative test for carpal tunnel syndrome. Assessment of wrist flexion and nerve compression” *J Bone Joint Surg Br*, 80: 493-498, (1998).
- [6] Levine D.W., Simmons B.P., Koris M.J. et al., “A self-administered questionnaire for the assessment of severity of symptoms and functional status in carpal tunnel syndrome”, *J Bone Joint Surg Am*, 75:1585-1592, (1993).
- [7] Jablecki C.K., Andary M.T., So Y.T., Wilkins D.E., Williams F.H., “Literature review of the usefulness of nerve conduction studies and electromyography for the evaluation of patients with carpal tunnel syndrome”, *Muscle Nerve*, 16:1392-1414, (1993).
- [8] Aminoff M.J., “Electromyography in Clinical Practice 2th ed”, Churchill Livingstone Inc, USA, (1987).
- [9] Bodofsky E.B., “Diagnosing mild carpal tunnel syndrome with interpolation”, *Electromyogr Clin Neurophysiol*, 44:379-383, (2004).
- [10] Kohara N., “Clinical and Electrophysiological Findings in Carpal Tunnel Syndrome”, *Brain Nerve*, 59: 1229-1238, (2007).

- [11] Shortliff E.H. and Climine J.J., "Biomedical Informatics: Computer Applications In Health Care & Biomedicine", *Springer*, Newyok USA, (2006).
- [12] Gubbia J., Buyya R., Marusica S., Palaniswami M., "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions", *Future Generation Computer Systems*, 29: 1645-1660, (2013).
- [13] Hanauer D.A., Ramakrishnan N., "Modeling temporal relationships in large scale clinical associations", *J Am Med Inform Assoc*, 20: 332-341, (2013).
- [14] Mullins I.M., Siadaty M.S., Lyman J., et al., "Data mining and clinical data repositories: insights from a 667,000 patient data set", *Comput Biol Med*, 36: 1351-77, (2006).
- [15] Wright A., Chen E.S., Maloney F.L., "An automated technique for identifying associations between medications, laboratory results and problems", *J Biomed Inform*, 43: 891-901, (2010).
- [16] Hoffman S., and Podgurski A., "Big Bad Data: Law, Public Health, and Biomedical Databases", *J.L. Med. & Ethics*, 41: 56-60, (2013).
- [17] Jensen P.B., Jensen L.J., Brunak S., "Mining electronic health records: towards better research applications and clinical care", *Nat Rev Genet*, 13: 395-405, (2012).
- [18] Ramakrishnan N., Hanauer D., Keller B., "Mining Electronic Health Records", *Computer*, 43: 77-81, (2010).
- [19] Kalra D., Musen M., Smith B., Ceusters W., "Argos Policy Brief on Semantic Interoperability", *Studies in health technology and informatics*, 170: 1-15, (2011).
- [20] Phan J.H., Quo C.F., Cheng C., Wang M.D., "Multiscale integration of omic, imaging, and clinical data in biomedical informatics", *IEEE Rev Biomed Eng* 5: 74-87, (2012).
- [21] Talan M.I., Canal M.R., Zinnuroğlu M., Alcan V., "Tıbbi Veri Ambarı Kullanarak Veri Madenciliği Sınıflandırma Algoritmalarının Karşılaştırılması", *1st International Turkish World Engineering and Science Congress*, Antalya, 7-10, (2017).
- [22] Hakim A.J., Cherkas L., El Zayat S., MacGregor A.J., Spector T.D., "The genetic contribution to carpal tunnel syndrome in women: a twin study", *Spector Arthritis Rheum*, 47: 275-279, (2002).
- [23] Lozano-Calderón S., Anthony S., Ring D., "The quality and strength of evidence for etiology: example of carpal tunnel syndrome", *J Hand Surg Am*, 33: 525-538, (2008).
- [24] Bland J.D.P., "Carpal tunnel syndrome", *Curr Opin in Int Med*, 4: 578-582, (2005).
- [25] Becker J., Nora D.B., Gomes I., Stringari F.F., Seitens R., Panosso J.S., "An evaluation of gender, obesity, age and diabetes mellitus as risk factors for carpal tunnel syndrome", *Clin Neurophysiol*, 113: 1429-1434, (2002).
- [26] Lam N., Thurston A., "Association of obesity, gender, age and occupation with carpal tunnel syndrome", *Aust N Z J Surg*, 68: 190-193, (1998).
- [27] Reinstein L., "Hand dominance in carpal tunnel syndrome", *Arch Phys Med Rehabil*, 62: 202-203, (1981).
- [28] İnternet: The Precision Medicine Initiative, <https://obamawhitehouse.archives.gov/node/333101> Son Erişim Tarihi: 15.08.2018.
- [29] Jameson J.L., Longo D.L., "Precision Medicine-Personalized, Problematic, and Promising", *Obstetrical & Gynecological Survey*, 70: 612-614, (2015)
- [30] Weiskopf N.G., Hripesak G., Swaminathan S., Weng C., "Defining and measuring completeness of electronic health records for secondary use", *J Biomed Inform*, 46: 830-836, (2013).
- [31] Chan K.S., Fowles J.B., Weiner J.P., "Electronic Health Records and the Reliability and validity of quality measures: a review of the literature", *Med Care Res Rev*, 67: 503-527, (2010).
- [32] Sullivan P., Goldmann D., "The promise of comparative effectiveness research", *JAMA*, 305: 400-401, (2011).
- [33] Fernandes L., O'Connor M., Weaver V., "Big data, bigger outcomes: Healthcare is embracing the big data movement, hoping to revolutionize HIM by distilling vast collection of data for specific analysis", *J Ahuma*, 83: 38-43, (2012).
- [34] Harper E.M., "The economic value of health care data", *Nurs Adm Q*, 37: 105-108, (2013).
- [35] Kulynych J. and Greely H.T., "Clinical genomics, big data, and electronic medical records: reconciling patient rights with research when privacy and science collide", *J Law Biosci*, 4: 94-132, (2017).
- [36] Kayaalp M., "Patient Privacy in the Era of Big Data", *Balkan Med J*, 35: 8-17, (2018).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



A comparison of copula families on dependence structure of extreme order statistics

Uç sıra istatistiklerinin bağımlılık yapısı üzerine kapula ailelerinin bir karşılaştırılması

Yazar(lar) (Author(s)): Ferhan BAŞ KAMAN¹, Hülya OLMUŞ²

ORCID¹: 0000-0002-1879-9215

ORCID²: 0000-0002-8983-708X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Baş Kaman F. ve Olmuş H., “Uç sıra istatistiklerinin bağımlılık yapısı üzerine kapula ailelerinin bir karşılaştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 855-862 (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.421978

A Comparison of Copula Families on Dependence Structure of Extreme Order Statistics

Araştırma Makalesi / Research Article

Ferhan BAŞ KAMAN^{1*}, Hülya OLMUŞ²

¹Şereflikoçhisar Faculty of Applied Science, Department of Banking and Finance, Yıldırım Beyazıt University, Ankara, Turkey

²Faculty of Science, Department of Statistics, Gazi University, Ankara, Turkey

(Geliş/Received : 08.05.2018 ; Kabul/Accepted : 02.10.2018)

ABSTRACT

Order statistics have an important place in probability theory and statistical inference, especially reliability analysis. It is aimed to compare the dependency structure with some copula families of min-max copula for the extreme order statistics in this study. Suitability of Clayton, Frank, Gumbel from Archimedean copula families, Gaussian, Farlie-Gumbel-Morgenstern and min-max copula are examined by simulation study. To find the most suitable copula family, some model selection criteries are used and important inferences are obtained.

Keywords: Dependent structure, order statistics, copula, simulation.

Uç Sıra İstatistiklerinin Bağımlılık Yapısı Üzerine Kapula Ailelerinin Bir Karşılaştırılması

ÖZ

Sıra istatistikleri, olasılık teorisinde ve istatistiksel çıkarımlarda özellikle güvenilirlik analizinde önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada uç sıra istatistiklerinin bağımlılık yapısı için min-max kapula ile bazı kapula aileleri karşılaştırılmıştır. Arşimedyen kapulalardan Clayton, Frank, Gumbel kapula aileleri, Gaussian, Farlie-Gumbel-Morgenstern ve min-max kapulaların uygunluğu simülasyon çalışması ile incelenmiştir. En uygun kapula ailesini bulmak için bazı model seçim kriterleri kullanılarak önemli çıkarımlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bağımlılık yapısı, sıra istatistikleri, kapula, simülasyon.

1. INTRODUCTION

Order statistics commonly used in statistical hypotheses, estimation problems, statistical process controls, reliability and risk management and in many practical fields and therefore it is of great importance by researchers [1]. Developments in detailed theories and applications with respect to order statistics can be referred by Arnold et al., Balakrishnan and Rao and David and Nagaraja [2-5].

Let $X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \dots \leq X_{(n)}$ denote the order statistics of independent and identically distributed (i.i.d.) random variables $X_1, X_2, \dots, X_n, n \in N$ with common distribution function F . It is known that, the lifetimes of series and parallel and systems are correspond to the $X_{(1)}$ and $X_{(n)}$, respectively. Therefore, many researchers have studied the dependency structure of extreme order statistics $X_{(1)}$ and $X_{(n)}$. One of the most important of these researches is min-max copula proposed by [6]. He found the dependency structure between $X_{(1)}$ and $X_{(n)}$ extreme order statistics where $X_1, X_2, \dots, X_n, n \in N$, are i.i.d. random variables.

Hence, Kendall's τ and Spearman's ρ are easily calculated and it is shown that $3\tau_n \geq \rho_n \geq \tau_n > 0$ and also

$\frac{\rho_n}{\tau_n} \rightarrow \frac{3}{2}$ is found and numerically proven. It is proved

Schmitz's assumption by applying L'Hospital's Rule to the copula between $X_{(1)}$ and $X_{(n)}$ by Li and Li and lastly studied three new formulas for Spearman's ρ between two identically distributed extreme order statistics by Chen, $X_{(1)}$ and $X_{(n)}$ when $n \geq 2$ by taking advantage of these results [7, 8]. Ghalibaf examined some measures of association between extreme order statistics $X_{(1)}$ and

$X_{(n)}$. He showed that dependence is decreasing function form n [9]. The dependency structure of order statistics are also frequently studied using Archimedean copulas. Li and Fang examined ordering properties on order statistics from heterogeneous observations by using Archimedean copulas [10]. Mesfioui et al. are devoted to characterize several ordering properties of the maximum order statistics of heterogenous random variables with an Archimedean copula [11].

In order to investigate the relationship between variables, it is necessary to reveal the dependency structure between variables and because of this reason, the concept of

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : fbaskaman@ybu.edu.tr

“copula” is being used in statistics literature in recent years. Many researchers studied the dependency structure of order statistics by means of copula function. The aim of this study is to compare the dependency structure with some copula families of min-max copula for the extreme order statistics. In addition, using the rank based methods, important inferences has been made for copula families. To achieve this goal, this article is organised as follows: In section 2, basic properties of copulas are given. Also, copulas, including Clayton, Frank, Gumbel, Gaussian, Farlie-Gumbel-Morgenstern and min-max copula, are briefly introduced. In section 3, dependency and ranks are discussed and also it is tried to explain why rank-based methods are used. In section 4, model selection criteries are presented. In section 5, simulations of copula are presented and lastly, the results are discussed in section 6.

2. BASIC PROPERTIES OF COPULAS

A copula is a function $C : [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ which satisfies following properties [12].

1. For every $u, v \in I$;
 $C(u, 0) = C(0, v) = 0$.
 $C(u, 1) = u$ ve $C(1, v) = v$.
2. For every $u_1, u_2, v_1, v_2 \in I$ such that $u_1 \leq u_2$ and $v_1 \leq v_2$;
 $C(u_2, v_2) - C(u_2, v_1) - C(u_1, v_2) + C(u_1, v_1) \geq 0$,

Following result is an important theory for copulas.

Theorem 1. (Sklar’s Theorem) H is a joint distribution function with margins F and G . For every $x, y \in \bar{R}$;

$$H(x, y) = C(F(x), G(y)), \tag{1}$$

where C is a copula. If F and G are continuous, C is unique; otherwise, C is uniquely determined on $RangeF \times RangeG$. Contrarily, if C is a copula and F and G are distribution functions, then the function H defined by (1) is a joint distribution function with margins F and G . If F and G are continuous C is defined as follows [12].

$$C(u, v) = H(F^{(-1)}(u), G^{(-1)}(v)) \tag{2}$$

2.1. Kendall’s Tau (τ)

Kendall’s τ is a nonparametric measures of association of between two random variables X and Y . The relation

of Kendall’s τ with C copula is given by Theorem 2. *Theorem 2.* Let C is common copula of continuous random variables X and Y . Then Kendall’s τ is given as follows [12].

$$\tau(C) = 4 \int_0^1 \int_0^1 C(x, y) dC(x, y) - 1 \tag{3}$$

2.2. Archimedean Copulas

Archimedean copulas are widely using in applications because of they can be constructed easily and they have many nice algebraic properties. Archimedean copulas at first appeared not in statistics, but rather in the study of probabilistic metric spaces, where they were studied as part of the development of a probabilistic version of the triangle inequality [12].

Properties of Archimedean copulas

Let φ is a continous, strictly decreasing function on $\varphi : I \rightarrow [0, \infty]$ such that $\varphi(1) = 0$ and $\varphi^{[-1]}$ is pseudo-inverse of φ and $Domain \varphi^{[-1]} = [0, \infty]$, $Range \varphi^{[-1]} = [0, 1]$ is given by

$$\varphi^{[-1]}(t) = \begin{cases} \varphi^{-1}(t) , & 0 \leq t \leq \varphi(0) \\ 0 , & \varphi(0) \leq t \leq \infty \end{cases} \tag{4}$$

Point out that $\varphi^{[-1]}$ is a continous and nonincreasing on $[0, \infty]$ and strictly decreasing on $[0, \varphi(0)]$. Hence, $C : [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ is defined as follows:

$$C(u, v) = \varphi^{[-1]}(\varphi(u) + \varphi(v)) \tag{5}$$

This form (5) of copulas are called Archimedean copulas and φ is called a generator of the copula. If $\varphi(0) = \infty$, φ is a strict generator and in this case, $\varphi^{[-1]}(\varphi(u) + \varphi(v))$ is said to be a strict Archimedean copula. Properties of generators are given as below.

1. $\varphi(1) = 0$.
2. For every $t \in (0, 1)$, $\varphi'(t) < 0$.
3. For every $t \in (0, 1)$, $\varphi''(t) \geq 0$.

Theorem 3. Let C is an Archimedean copula and φ its generator;

1. C is symmetric, namely, for every $u, v \in I$, $C(u, v) = C(v, u)$.
2. C is associative, namely, for every $u, v, w \in I$, $C(C(u, v), w) = C(u, C(v, w))$.

Table 1. Archimedean copulas used in this study

| Copula | $C_\theta(u, v)$ | $\varphi_\theta(t)$ | Parameter interval | Kendall’s τ |
|---------|---|--|-------------------------------------|---|
| Clayton | $[\max(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1, 0)]^{-\frac{1}{\theta}}$ | $\frac{1}{\theta}(t^{-\theta} - 1)$ | $[-1, \infty) \setminus \{0\}$ | $\frac{\theta}{\theta + 2}$ |
| Frank | $-\frac{1}{\theta} \ln(1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{(e^{-\theta} - 1)})$ | $-\ln \frac{e^{-\theta t} - 1}{e^{-\theta} - 1}$ | $(-\infty, \infty) \setminus \{0\}$ | $1 - \frac{4}{\theta} [D_1(-\theta) - 1]$ |
| Gumbel | $\exp(-[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{\frac{1}{\theta}})$ | $(-\ln t)^\theta$ | $[1, \infty)$ | $\frac{\theta - 1}{\theta}$ |

*where $D_1(\theta) = \frac{1}{\theta} \int_0^1 \frac{t}{e^t - 1}$

3. If $c > 0$ is any constant, $c\phi$ is also a generator of C [12].

Table 1 gives the Archimedean copulas which used in this study, their functions $C_\theta(u, v)$, generators $\phi_\theta(t)$, parameter intervals and connecting with Kendall's τ [12]

2.3. Farlie-Gumbel-Morgenstern (FGM) Copula

FGM copula is defined as follows:

$$C_\theta(u, v) = uv[1 + \theta(1-u)(1-v)], \quad \theta \in [-1, 1] \quad (6)$$

The relations of Kendall's τ with FGM is $\tau = \frac{2\theta}{9}$ [12].

2.4. Gaussian Copula

The Gaussian copula is derived from multivariate Gaussian distribution. Φ is the distribution function of one-dimensional standard normal distribution and let Φ_Σ^n is the distribution function of the positive definite correlation matrix Σ and n-dimensional standard normal distribution. Hence, n-dimensional Gaussian copula C_Σ^Φ is defined as follows;

$$C_\Sigma^\Phi(u_1, \dots, u_n) = \Phi_\Sigma^n(\Phi^{-1}(u_1), \dots, \Phi^{-1}(u_n)), \quad (7)$$

$$\forall(u_1, \dots, u_n) \in [0, 1]^n$$

For $n = 2$, 2-dimensional Gaussian copula is defined as follows:

$$C_{\rho_{12}}^\Phi(u, v) = \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(v)} \frac{1}{2\pi(1-\rho_{12}^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{s^2 - 2\rho_{12} \cdot s \cdot t + t^2}{2(1-\rho_{12}^2)}\right) ds dt, \quad (8)$$

$$(u, v) \in [0, 1]^2$$

where ρ_{12} is the correlation coefficient of bivariate standard normal distribution. The relation of Kendall's τ with Gaussian copula is defined as $\tau = \frac{2}{\pi} \arcsin(\rho_{12})$ [13].

Table 2. Sample data

| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| X_{1i} | 0.4612 | 2.9783 | 0.4443 | 2.2599 | 3.2763 |
| X_{2i} | 1.6727 | 3.8142 | 1.8476 | 1.3407 | 2.1501 |

2.5. Min-max Copula

$X_{(1)}$ and $X_{(n)}$ denote the extreme order statistics of i.i.d. random variables $X_1, X_2, \dots, X_n, n \in N$. The marginals of $X_{(1)}$ and $X_{(n)}$ and the joint cumulative distribution function of $X_{(1)}$ and $X_{(n)}$ are given as follows [2].

$$F_1(x) = P\{X_{(1)} \leq x\} = 1 - [1 - F(x)]^n, \quad -\infty < x < \infty \quad (9)$$

$$F_n(x) = P\{X_{(n)} \leq x\} = F(x)^n, \quad -\infty < x < \infty \quad (10)$$

$$F_{(1),(n)}(x, y) = P\{X_{(1)} \leq x, X_{(n)} \leq y\} = \begin{cases} F(y)^n - (F(y) - F(x))^n, & x < y \\ F(y)^n, & x \geq y \end{cases} \quad (11)$$

The copula can be derived from $C(u, v) = H(F^{(-1)}(u), G^{(-1)}(v))$ where $F^{(-1)}$ denotes the generalized inverse. Here $F^{(-1)}(u)$ and $G^{(-1)}(v)$ are found as follows:

$$u = 1 - [1 - F(x)]^n \quad v = G(y)^n$$

$$F^{(-1)}(u) = 1 - [1 - u]^{1/n} \quad G^{(-1)}(v) = v^{1/n}$$

Then, by solving the equation $C_n(F_1(x), F_n(y)) = F_{(1),(n)}(x, y)$

$$C_n = \begin{cases} v - (v^{1/n} + (1-u)^{1/n} - 1)^n, & 1 - (1-u)^{1/n} < v^{1/n} \\ v, & 1 - (1-u)^{1/n} \geq v^{1/n} \end{cases} \quad (12)$$

C_n is call min-max-copula and it describes the dependence between $X_{(1)}$ and $X_{(n)}$ completely [6].

3. DEPENDENCE AND RANKS

Let assume that $X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1n}$ and $X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2n}$ are given from pairs (X_1, X_2) of continuous variables. $H(x_1, x_2)$ is bivariate distribution function of (X_1, X_2) . In view of Sklar's theorem, there exists a unique copula C for which identity, Eq. (1), holds. Thus, by using $F(x_1)$ and $G(x_2)$, uniquely C copula can be derived.

Consider the transformed pairs $Z_i = \exp(2X_{1i}), T_i = \exp(3X_{2i})$.

The pairs (Z, T) are transformed of the pairs (X_1, X_2) and both of them have same copula [14].

Table 2 shows five independent pairs of mutually independent observations (X_{1i}, X_{2i}) generated from the

$N(2, 1)$ distribution using Matlab R2017b

In Figure 1, scatter plots of the pairs (X_1, X_2) , transformed data (Z, T) and ranks derived from the (X_1, X_2) and (Z, T) are given.

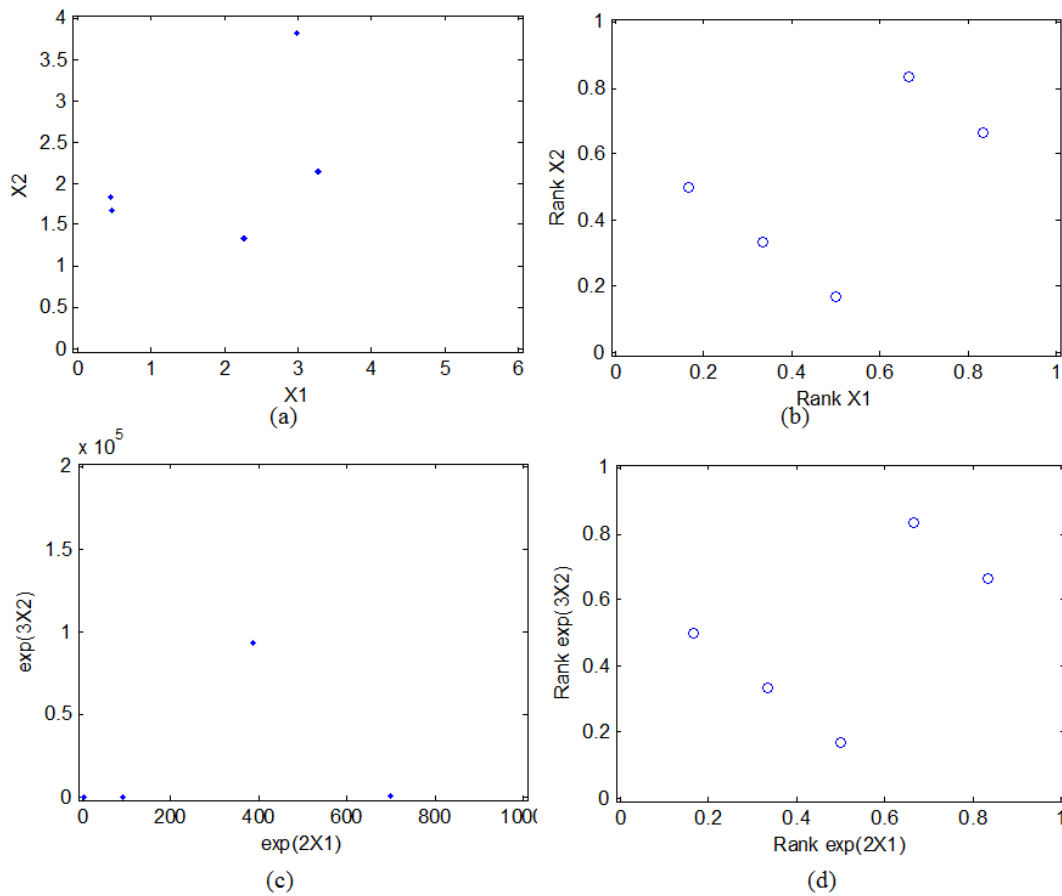


Figure 1. Scatter plots of the pairs (a) (X_1, X_2) (b) $(Z, T) = (\exp(2X_{1i}), \exp(3X_{2i}))$ (c) ranks of (X_1, X_2) and (d) ranks of $(Z, T) = (\exp(2X_{1i}), \exp(3X_{2i}))$

When Figure 1 is examined, scatter plots of (X_1, X_2) and transformed data (Z, T) are substantially different, however, scatter plots of ranks of (X_1, X_2) and transformed data (Z, T) are completely same. Therefore, the use of ranks lead to more accurate results. In this study, rank based methods are used for copulas.

Let (X, Y) be measured data, u_i, v_i are rank of (X, Y) which are defined as

$$\begin{cases} u_i = \frac{\text{rank}(X_i)}{N+1} \\ v_i = \frac{\text{rank}(Y_i)}{N+1} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

where $\text{rank}(X_i)$ (or $\text{rank}(Y_i)$) denotes the rank of X_i (or Y_i) among X (or Y) in an ascending order. Thus the measured data in original space is transformed into the standard uniform random vector (u, v) [15].

4. MODEL SELECTION CRITERIES

There are many methods in the literature to choose the most suitable copula for the database. First, Chi-square goodness of fit test is determined as suitability of

copulas for dataset. Then the best-fit copula is obtained by Akaike Information Criterion and Bayesian Information Criterion and lastly, scatter plot of generating data from copulas are examined.

Chi-square goodness of fit: Chi-square goodness of fit test is calculated as follows:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (14)$$

Here O_{ij} represents the observed frequencies and E_{ij} represents the expected frequencies. Degrees of freedom is calculated as $df = ((I - 1)(J - 1)) - p - (q - 1)$, I is the number of rows, J is the number of columns, p is the number of parameters estimated and q is the number of cells pooled together. If the table value corresponding to the degrees of freedom is greater than the calculated chi-square, the copula is found suitable [16].

Akaike Information Criterion-AIC and Bayesian Information Criterion-BIC: The best-fit copula is identified by comparing the evaluated values of *AIC* and *BIC* which are defined as

$$AIC = -2 \sum_{i=1}^N \ln c(u_i, v_i) + 2k, \tag{15}$$

$$BIC = -2 \sum_{i=1}^N \ln c(u_i, v_i) + k \ln N \tag{16}$$

where k is the number of copula parameters, N is the sample size and $c(u_i, v_i)$ is the probability density function of $C(u_i, v_i)$, (u_i, v_i) obtained from Eq. (13) [17, 18]. A copula corresponding to the lowest AIC value or BIC value is determined as the best-fit copula [15].

Scatter Plot: The scatter plot of ranks of original data can be also capture the dependency structure. The most similar scatter plot of data obtained from copula to the scatter plot of the ranks of original data is determined as best-fit copula [14].

5. SIMULATION STUDY

In this section, suitability of Clayton, Frank, Gumbel from Archimedean copula families, Gaussian, FGM and min-max copula are examined by simulation study. Avérous et al. formalized the proof that the copula associated with a pair of order statistics does not depend on the parent distribution [19]. Based on this study,

firstly, we drawn random samples from normal, uniform and exponential distributions. After we have seen that similar results were obtained from all distributions we use, we only used normal distribution. Let's assume random samples are drawn from $X \sim N(2,1)$ distribution and $X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}$ are order statistics of these samples. The dependency relationships of $X_{(1)}, X_{(n)}$ order statistics for different n values ($n = 2, 5, 10, 20, 100, 200$) are evaluated in this study. First, to obtain observed frequencies in Chi-square goodness of fit test, we used the ranks of $X_{(1)}, X_{(n)}$ order statistics classified with 4×4 quartile points (for $j = 1, 2, 3, 4$ $1000 \times \frac{j}{4}$). In Table 3, τ value is Kendall's

tau obtained from $X_{(1)}, X_{(n)}$ order statistics, θ are parameter estimates for copula families by using τ value. Then, expected frequencies are obtained from copulas by means of θ . It is repeated $r=500$ times. χ^2 values for each copula family is calculated by using the

Table 3. Comparison of simulation results for copulas

| n | τ | Copula | θ | χ^2 | $\chi^2_{8;0.05}$ | p-value | AIC | BIC |
|-----|--------|----------|----------|----------|-------------------|---------|-----------|-----------|
| 2 | 0.3294 | Frank | 3.2593 | 140.0462 | 15.51 | 0.0000 | -230.4088 | -225.5011 |
| | | Clayton | 0.9826 | 116.5814 | 15.51 | 0.0000 | -169.7322 | -164.8254 |
| | | Gumbel | 1.4913 | 118.3252 | 15.51 | 0.0000 | -213.7415 | -208.8337 |
| | | FGM | 1.4825 | - | 15.51 | - | - | - |
| | | Min-max | 2 | 14.3332 | 15.51 | 0.0735 | -3377.5 | -3372.6 |
| | | Gaussian | 0.4947 | 114.8323 | 15.51 | 0.0000 | -249.6951 | -244.7874 |
| 5 | 0.0965 | Frank | 0.8758 | 22.0341 | 15.51 | 0.0049 | -18.6516 | -13.7438 |
| | | Clayton | 0.2138 | 19.1601 | 15.51 | 0.0140 | -11.5356 | -6.6278 |
| | | Gumbel | 1.1069 | 19.7345 | 15.51 | 0.0114 | -10.8259 | -5.9181 |
| | | FGM | 0.4346 | 17.8609 | 15.51 | 0.0223 | -19.7405 | -14.8327 |
| | | Min-max | 5 | 11.7187 | 15.51 | 0.1642 | -929.211 | -924.3033 |
| | | Gaussian | 0.1511 | 17.4738 | 15.51 | 0.0255 | -19.0115 | -14.1037 |
| 10 | 0.0392 | Frank | 0.3532 | 12.0316 | 15.51 | 0.1498 | -1.3707 | 3.5371 |
| | | Clayton | 0.0816 | 11.4153 | 15.51 | 0.1793 | 0.2492 | 5.1567 |
| | | Gumbel | 1.0408 | 10.8653 | 15.51 | 0.2094 | -2.0630 | 2.8447 |
| | | FGM | 0.1764 | 10.7895 | 15.51 | 0.2139 | -1.3509 | 3.5569 |
| | | Min-max | 10 | 12.9961 | 15.51 | 0.1120 | -422.0772 | -417.1695 |
| | | Gaussian | 0.0615 | 11.2567 | 15.51 | 0.1876 | -2.9461 | 1.9617 |
| 20 | 0.0259 | Frank | 0.2333 | 14.6592 | 15.51 | 0.0661 | 0.4755 | 5.3832 |
| | | Clayton | 0.0532 | 14.3174 | 15.51 | 0.0739 | -1.7111 | 3.1966 |
| | | Gumbel | 1.0266 | 15.3692 | 15.51 | 0.0524 | 2.3511 | 7.2591 |
| | | FGM | 0.1166 | 15.1108 | 15.51 | 0.0570 | 0.4891 | 5.3968 |
| | | Min-max | 20 | 15.4470 | 15.51 | 0.0510 | -203.4450 | -198.5372 |
| | | Gaussian | 0.0407 | 15.2036 | 15.51 | 0.0553 | 0.3343 | 5.2421 |
| 100 | 0.0135 | Frank | 0.1215 | 11.5544 | 15.51 | 0.1722 | 1.5878 | 6.4956 |
| | | Clayton | 0.0274 | 12.1262 | 15.51 | 0.1457 | 0.6212 | 5.5289 |
| | | Gumbel | 1.0137 | 12.0672 | 15.51 | 0.1482 | 1.8853 | 6.7930 |
| | | FGM | 0.0607 | 11.5576 | 15.51 | 0.1721 | 1.5831 | 6.4908 |
| | | Min-max | 100 | 11.9264 | 15.51 | 0.1545 | -39.040 | -34.1862 |
| | | Gaussian | 0.0212 | 12.0399 | 15.51 | 0.1494 | 0.8045 | 5.7132 |
| 200 | 0.0062 | Frank | 0.0555 | 17.2599 | 15.51 | 0.0275 | 1.9103 | 6.8181 |
| | | Clayton | 0.0124 | 17.3160 | 15.51 | 0.0270 | 1.8614 | 6.7691 |
| | | Gumbel | 1.0062 | 17.7051 | 15.51 | 0.0235 | 2.0170 | 6.9247 |
| | | FGM | 0.0277 | 17.0802 | 15.51 | 0.0293 | 1.9091 | 6.8169 |
| | | Min-max | 200 | 17.4716 | 15.51 | 0.0256 | -18.3476 | -13.4398 |
| | | Gaussian | 0.0097 | 17.5871 | 15.51 | 0.0245 | 1.9854 | 6.8932 |

obtained values. The below hypothesis is used to test the suitability of each and every family to data set.

H_0 : Copula family is suitable for dataset.

H_1 : Copula family is not suitable for dataset.

Degrees of freedom is calculated via frequency matrix classified with 4×4 quartile points and the value of $\chi^2_{8;0.05} = 15.51$ is compared with calculated χ^2 values for all copula families. Then, the best-fit copula is determined by *AIC* and *BIC*. The ranks of frequency matrix of $X_{(1)}, X_{(n)}$ order statistics are again used in here. All situations and results are given in Table 3. Since the parameter range of the FGM copula and Kendall's τ value for FGM copula are between $[-1,1]$ and $[-2/9, 2/9]$, respectively, this copula is not applicable for $n = 2$

When $n = 2$ and $n = 5$, we can not reject H_0 for min-max copula but we can reject H_0 for Clayton, Frank, Gumbel, Gaussian and FGM copula families. Therefore, only min-max copula is founded suitable for data set. For $n = 2$, when we examine the highest *AIC* and *BIC* values, first eliminated copula is Clayton and later, Gumbel, Frank and Gaussian, respectively. For $n = 5$, first eliminated copula is Gumbel and later, Clayton, Frank, Gaussian and FGM are determined.

When $n = 10$, we can not reject H_0 for all copula families and all of them are founded suitable for data set. Here, the copula with the lowest *AIC* and *BIC* values is identified as min-max copula, hence, as the best-fit copula. Later, Gaussian, Gumbel, Frank, FGM and lastly the worst copula as Clayton are determined.

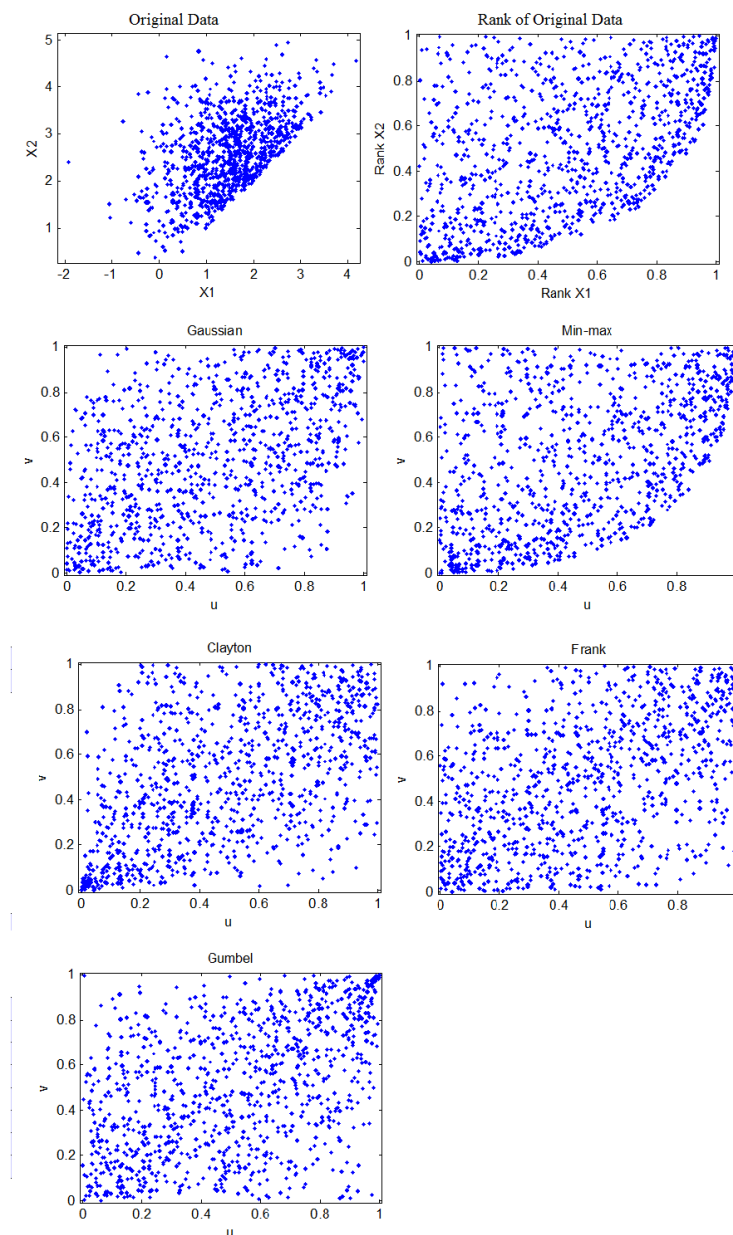


Figure 1. Scatter plots of original data, ranks of original data and copulas for $n = 2$

When $n = 20$ and $n = 100$, we can not reject H_0 for all copula families and all of them are founded suitable for data set again. Here, the copula with the lowest AIC and BIC values is identified as min-max copula, hence, as the best-fit copula. Then, Clayton, Gaussian, FGM, Frank and Gumbel are identified, respectively.

When $n = 200$, we can reject H_0 for all copula families and all of them are not founded suitable for data set. Here, first eliminated copula is Gumbel and later, Gaussian,

Frank, FGM, Clayton and Min-max copula. We can say that Min-max copula is better than others but AIC and BIC values of other copula families are very close to each other, so it wouldn't be right to say clearly which one is better.

The scatter plot of ranks of original data can be also capture the dependency structure.

Figure 1 and Figure 2 shows scatter plots for $n = 2$ and $n = 10$, respectively.

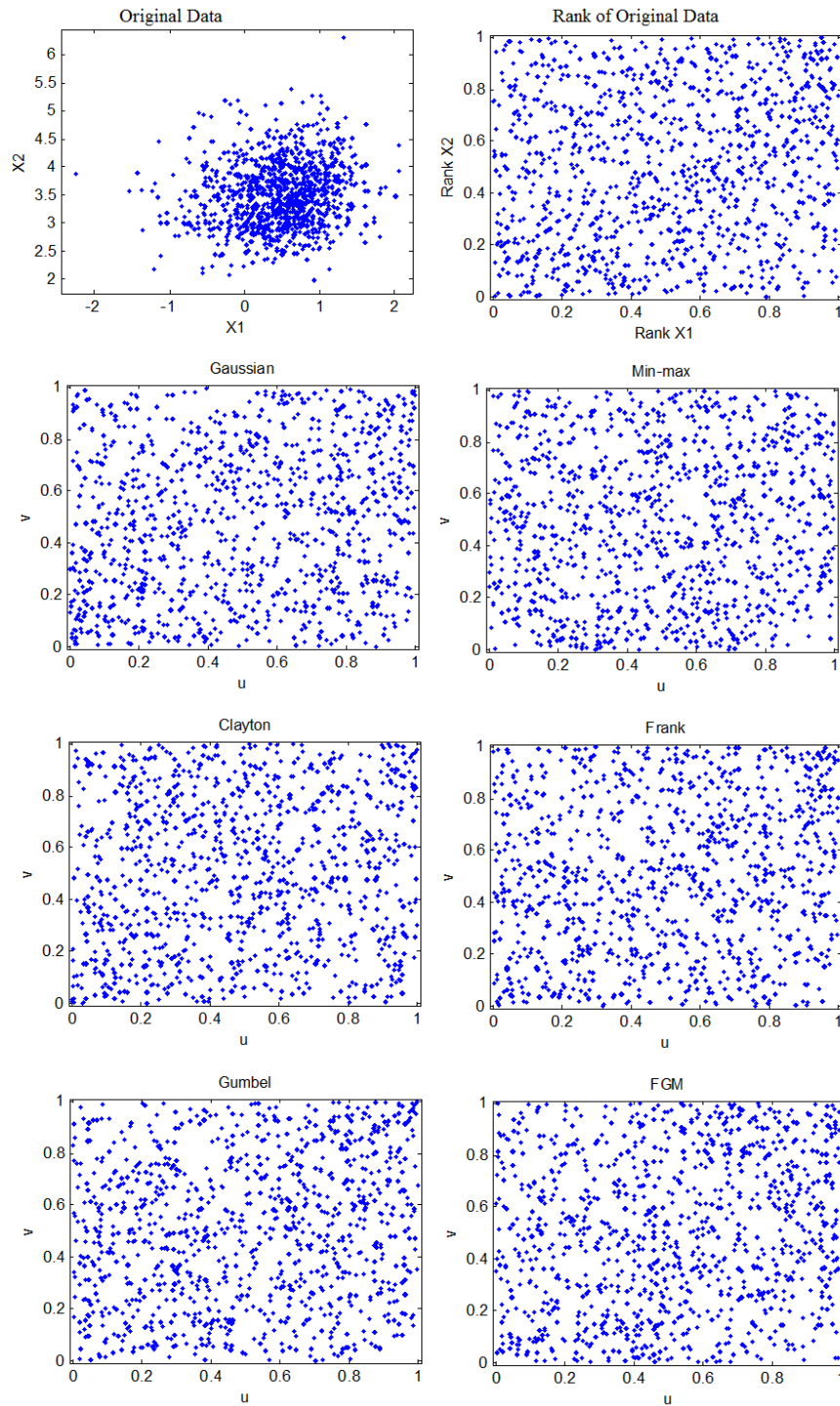


Figure 2. Scatter plots of original data, ranks of original data and copulas for $n = 10$

Figure 1 shows that min-max copula matches exactly the ranks of original data and we can easily visible min-max copula as the best-fit copula for $n = 2$. For $n = 10$, it is very difficult distinguish the best-fit copula among them in Figure 2 because of the ranks of the original data is very complicated and scattered. Also, it is very difficult to distinguish to the best-fit copula for $n = 20, 100$, too

6. CONCLUSION

The study is intended to explore the dependency structure of the extreme order statistics which represents the minimum and maximum of n i.i.d. variables. The change in dependency is examined for different n values by means of simulation study and it is also aimed to find the copula family most suitable to explain dependency. Rank based methods is used for model selection and also it is tried to explain why rank-based methods are used. According to the results, for small n values ($n = 2, 5$) only min-max copula is found suitable for dataset and when we examined scatter plots for $n = 2$, we can easily distinguish the best-fit copula as min-max copula. For $n = 10, 20, 100$, all copula families are founded suitable for data set but the best-fit copula is determined as min-max copula by means of AIC and BIC . Here, Clayton copula is the worst copula among the other copulas for $n = 10$. However, Clayton copula is found better than Gaussian, Frank, Gumbel, FGM copulas for $n = 20, 100$. For $n = 200$ no copula families has been founded suitable for data set. Eventually, according the simulation results, min-max copula is the best one for small n values, however, it is not very useful for large n values.

REFERENCES

- [1] Li X., Fang R., "Ordering properties of order statistics from random variables of Archimedean copulas with applications", *Journal of Multivariate Analysis*, 133: 304-320, (2015).
- [2] Arnold B.C., Balakrishnan N., Nagaraja H.N., "A First Course in Order Statistics", Vol. 54, John Wiley&Sons, New York, (1992).
- [3] Balakrishnan N., Rao C. R., "Handbook of Statistics 16: Order Statistics: Theory and Methods", Elsevier, New York, (1998a).
- [4] Balakrishnan N., Rao C. R., "Handbook of Statistics 17: Order Statistics: Applications", Vol. 42, Elsevier, New York, (1998b).
- [5] David H. A., Nagaraja H. N., "Order Statistics", Wiley&Sons, Third edition, New Jersey, (2003).
- [6] Schmitz V., "Revealing the dependence structure between $X_{(1)}$ and $X_{(n)}$ ", *Journal of Statistical Planning Inference*, 123(1): 41-47, (2004).
- [7] Li X., Li Z., "Proof of a conjecture on Spearman's ρ and Kendall's τ for sample minimum and maximum", *Journal of Statistical Planning Inference*, 137(1): 359-361, (2007).
- [8] Chen YP., "A note on the relationship between Spearman's ρ and Kendall's τ for extreme order statistics", *Journal of Statistical Planning Inference*, 137(7): 2165-2171, (2007).
- [9] Ghalibaf M. B., "Dependent structure of extreme order statistics", *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 86: 2846-2855, (2016).
- [10] Li X., Fang R., "Ordering properties of order statistics from random variables of Archimedean copulas with applications", *Journal of Multivariate Analysis*, 133: 304-320, (2015).
- [11] Mesfioui M., Kayid M., Izadkhah S., "Stochastic comparisons of order statistics from heterogeneous random variables with Archimedean copula", *Metrika*, 80: 749-766, (2017).
- [12] Nelsen R.B., "An Introduction to Copulas, in: Lecture Notes in Statistics" Vol. 139, Springer, New York, (1999).
- [13] Embrechts P., Lindskog F., McNeil A., "Modeling dependence with copulas and applications to risk management", In: S.T. Rachev, editor, Handbook of Heavy Tailed Distribution in Finance, JAI Press: Handbooks in Finance, 357-360, (2003).
- [14] Genest C., Favre A.C., "Everything you always wanted to know about copula modeling but were afraid to ask", *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(4): 347-368, (2007).
- [15] Li D.Q., Tang X.S., Phoon K.K. and Chen Y.F., "Bivariate simulation using copula and its application to probabilistic pile settlement analysis", *International Journal Numerical Analytical Methods Geomechanics*, 37: 597-617, (2013).
- [16] Genest C., Rivest L. P., "Statistical inference procedures for bivariate Archimedean copulas", *Journal of the American Statistical Association*, 88(3): 1034-1043 (1993).
- [17] Akaike H., "A new look at the statistical model identification", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6): 716-723, (1974).
- [18] Schwarz G., "Estimating the dimension of a model", *The Annals of Statistics*, 6(2): 461-464, (1978).
- [19] Av rous, J., Genest, C., Kochar, S.C. "On the dependence structure of order statistics", *Journal of Multivariate Analysis*, 94(1): 159-171, (2005).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Yenilenebilir enerji kullanımındaki göreceli etkinliklerin veri zarflama analizi ile değerlendirilmesi: Türkiye ve yedi Avrupa ülkesi örneği

Evaluation of relative efficiency using renewable energy by data envelopment analysis: Turkey and seven European countries example

Yazar(lar) (Author(s)): Zühre AYDIN YENİOĞLU¹, Vildan ATEŞ²

ORCID¹: 0000-0002-5992-4983

ORCID²: 0000-0002-8855-8556

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Aydın Yenioğlu Z. ve Ateş, V., “Yenilenebilir enerji kullanımındaki göreceli etkinliklerin veri zarflama analizi ile değerlendirilmesi: Türkiye ve yedi Avrupa ülkesi örneği”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 863-869, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.446110

Yenilenebilir Enerji Kullanımındaki Göreceli Etkinliklerin Veri Zarflama Analizi ile Değerlendirilmesi: Türkiye ve Yedi Avrupa Ülkesi Örneği

Araştırma Makalesi / Research Article

Zühre AYDIN YENİOĞLU¹, Vildan ATEŞ²

¹Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu; Bilişim Enstitüsü, Yönetim Bilişim Sistemleri, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

²İşletme Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye
(Geliş/Received : 19.07.2018 ; Kabul/Accepted : 12.11.2018)

ÖZ

Türkiye ve diğer Dünya ülkeleri için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı son yıllarda artan bir eğilim göstermektedir. Ülkeler yenilenebilir enerji konusunda ilerleme sağlamak amacıyla, bu alana yönelik çalışmalar, düzenlemeler, yatırımlar yapmaktadırlar. Bu çalışmada söz konusu çalışmaların etkisinin incelenmesi için Türkiye ve 2020 yenilenebilir hedeflerine ulaşmış 7 Avrupa ülkesinin 2015 ve 2016 yılları içerisinde teknik ve ölçek etkinlikleri Veri Zarflama Analizi (VZA) ile hesaplanmıştır. Karar verme birimleri arasında yer alan Avrupa ülkeleri Avrupa'nın toplam enerji tüketimindeki payın yenilenebilir enerji alanında %20'ye çıkarılması; enerji verimliliğinin %20 artırılması gibi 2020 hedeflerine ulaşmıştır. 2023 yılına kadar toplam enerji üretiminin 30% unu yenilenebilir enerji üretiminden yapmayı hedefleyen Türkiye, 2020 yılına kadar sektöre verdiği desteklerle yenilenebilir enerji üretim şeklini yerel kaynaklara çevirmeyi planlamıştır. VZA uygulamasının çözümünde Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (General Algebraic Modeling System, GAMS) kullanılmıştır. Yerelde teknik etkinlik ve genelde teknik etkinlik ölçümü ve modeller arasında tutarlılığın sağlandığını göstermek amacıyla Charnes-Cooper-Rhodes (CCR) girdi-çıkıtı ile Banker, Charnes ve Cooper (BCC) girdi-çıkıtı modelleri üzerinde çalışılmış ve teknik ve ölçek etkinlikleri ölçülmüştür. 2015 ve 2016 yıllarını kapsayan veri setleri Dünya Bankası ve İngiliz Petrolün (İP) yayınladıkları yıllık bültenlerden derlenmiş ve çalışma kapsamında girdi olarak yıllık yenilenebilir enerji yatırımları, birincil enerji tüketimi ve yenilenebilir enerji tüketimi, çıktı olarak ise gayri safi yurt içi hâsıla modele eklenmiştir. 2015 ve 2016 yılları veri setleri ortalamaları alınarak modellerde kullanılan değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları ve bu yıllara ait etkinlik sonuçları hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda 2015 ve 2016 yıllarında Türkiye ve Avrupa'nın 2020 yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşmış ülkeleri ile kıyaslandığında sayısal olarak yatırım, tüketim ve GSYH açısından geride kalmış ve 2015 ve 2016 yılları içerisinde de Türkiye etkin olamamıştır.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, veri zarflama analizi, enerji verimliliği.

Evaluation of Relative Efficiency Using Renewable Energy by Data Envelopment Analysis: Turkey and Seven European Countries Example

ABSTRACT

The use of renewable energy sources for Turkey and other countries of the world shows an increasing trend in recent years. In order to make progress in the field of renewable energy, countries deviate from studies, regulations and investments. In this study, to examine the impact of those studies, technical and scale of events in Turkey and in seven European countries that achieved their 2020 renewable targets, was calculated with 2015 and 2016 data by Data envelopment analysis (DEA). European countries, which are among the decision-making units, have increased the renewable energy consumption to 20% and energy efficiency to 20% by 2020. Turkey's aim is to make 30% of total energy production from renewable energy production by 2023, to partially convert renewable energy production into local resources with support for the sector by 2020. General Algebraic Modeling System (GAMS) was used in the solution of DEA models. In order to show technical efficiency and generally technical effectiveness measurement and consistency between models, Charnes-Cooper-Rhodes (CCR) input-output and Banker, Charnes and Cooper (BCC) input-output models were studied and the technical and scale activities were measured. The data sets covering the years 2015 and 2016 were compiled from the annual bulletins published by the World Bank and British Petroleum (IP), and annual renewable energy investments, primary energy consumption and renewable energy consumption were used as inputs, the gross domestic product was used as output in the model. The correlation coefficients between the variables used in the models and the efficiency results of these years were calculated by taking the averages of the data sets of 2015 and 2016. In conclusion, compared with other decision-making units, Turkey could not be effective numerically according to renewable energy investment, consumption and GDP in 2015 and 2016.

Keywords: Renewable energy, data envelope analysis, energy efficiency.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mfecidpc@gmail.com

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde ülkelerin endüstrisinin ihtiyaç duyduğu enerjiyi en az maliyetle sağlaması o ülkeye rekabet avantajı sağlamaktadır. Bu durum ülkeleri petrol, doğal gaz ya da kömür gibi geleneksel fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olmasından dolayı alternatif enerji kaynaklarına yani yenilenebilir enerjiye yöneltmektedir. Yenilenebilir enerji de, geleneksel enerji kaynaklarına göre çevresel faydalar ve fiyat avantajları nedeniyle vazgeçilmez bir alternatif enerji kaynağıdır [1]. Türkiye’de yenilenebilir enerji (hidroelektrik enerjisi, rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji) kullanımı giderek yaygınlaşmakla birlikte enerji ihtiyacının büyük bir kısmı halen yenilenemeyen enerji kaynaklarından (petrol, doğal gaz, kömür) sağlanmaktadır [2]. Diğer taraftan yenilenebilir enerji üretim konusunda Avrupa Birliği ülkeleri ile karşılaştırıldığında yenilenebilir enerji potansiyeli, iklim koşullarından dolayı Türkiye’ye avantaj sağlamaktadır [1].

Literatürde enerji sektöründe yapılan çalışmalar incelendiğinde öne çıkan yöntemlerden birinin Veri Zarflama Analizi (VZA) olduğu görülmektedir. VZA ilk olarak Farrell (1957) tarafından ortaya atılmış Charnes ve diğerlerinin (1978) çalışmasında teknik etkinliğin değerlendirilmesiyle geliştirilmiştir [3,4]. Bunun yanında VZA, ilgili fonksiyonun herhangi bir varsayımını gerektirmediği ve çeşitli birimlerin çoklu girdi ve çıktı değişkenlerini işleyebildiği için kolay uygulanabilir bir yöntemdir [5]. VZA enerji alanında da yapılan çalışmalarda sıklıkla kullanılan yöntemlerden birisidir. Bunlara örnek olarak aşağıdaki çalışmalar verilebilir. Nepalde (2006) yapılan çalışmada araştırmacılar VZA kullanarak hidroelektrik santrallerin performanslarını ölçmüşler ve çalışmada girdi olarak mevcut kapasite, toplam operasyon sayısı, tesis tarafından üretilen enerji ve çalışan sayısını, çıktı olarak ise üretilen enerji, kış ve yaz puant değerlerini kullanmışlardır [6]. Yenilenebilir enerji teknolojilerini ülkeler düzeyinde karşılaştırmak için yapılan bir diğer çalışmada, araştırmacılar 45 ülkeyi VZA kullanarak değerlendirmişler¹ ve OECD ülkelerinin, OECD üyesi olmayan ülkelere göre yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde daha fazla pay sahibi olduklarını belirtmişlerdir [7]. Barros tarafından 2008 yılında yapılan çalışmada da VZA kullanılarak hidroelektrik santrallerin verimliliği araştırılmıştır [8]. Sözen ve diğerleri tarafından (2010) yapılan çalışmada Türkiye’deki termal elektrik santrallerinin operasyonel ve çevresel performansının değerlendirilmesi için veri zarflama analizi kullanılmıştır [9]. Bu çalışmada kullanılan girdiler kapasite kullanım oranı, termal verim, ortalama çalışma süresi ve üretim kapasitesiyken, çıktılar karbondioksit, sülfür dioksit, azot dioksitin ton miktarlarıdır. San Cristobal (2011), yenilenebilir enerji teknolojilerini değerlendirmek için VZA kullanan diğer bir araştırmacıdır. Bu çalışma incelendiğinde girdileri yatırım oranı, uygulama süresi ile işletme ve bakım maliyetleriyken çıktılar güç, çalışma saatleri, hizmet süresi ve karbondioksit tonundan oluştuğu görülmektedir

[10]. Türkiye’de yapılan bir diğer çalışmada, hidroelektrik santrallerinin verimlilik değerlendirmesi için 2012 yılında Sözen ve diğerleri tarafından VZA kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan girdiler kapasite kullanım faktörü, kurulu kapasite, barajda su toplama miktarıyken çıktı değişkenleri birim maliyet, operasyonel maliyet ve net enerji üretimidir [11].

Yenilenebilir enerji kaynakları kendilerini sürekli yeniledikleri için tükenmeleri söz konusu değildir. Diğer taraftan bu kaynaklardan enerji elde etmek maliyetli olduğundan kaynakların kullanılması bakımından etkinliklerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi önemli bir konu haline gelmiştir. Avrupa Birliği 2009 yılında, 2020 yılı için nihai enerji tüketimini %20 oranında yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlama hedefi getirmiştir. Eurostat verilerine göre de 2016 yılında bu oran %17 olarak gerçekleşmiştir. 2023 yılına kadar toplam enerji üretiminin %30’unu yenilenebilir enerji üretiminden yapmayı hedefleyen Türkiye, 2020 yılına kadar sektöre verdiği desteklerle yenilenebilir enerji üretim şeklini kısmen yerel kaynaklara çevirmeyi planlamıştır. Yenilenebilir enerji tesislerinin geliştirilmesi, ekipman, bileşen ve hizmet tedariki sayesinde gayri safi yurtiçi hasıla (GSYH) üzerinde önemli bir etki yaratılacaktır. Bu sayede ekonomiye katkı sağlanacak, nitelikli istihdam artacak, araştırma geliştirme faaliyetleri gelişecektir.

Elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanmasında yerli ve yenilenebilir kaynaklar öncelikli olup, bu kaynakların kullanımı konusundaki gelişmeler ve arz güvenliği dikkate alınarak kaliteli ithal kömüre dayalı santrallerden de yararlanılacaktır. Yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı için alınacak tedbirler sonucunda, elektrik üretiminde doğalgazın payının %30’un altına düşürülmesi hedeflenmektedir.

Bu çalışmada, Türkiye ve 2020 Avrupa yenilenebilir enerji üretim, yatırım ve tüketim hedeflerine ulaşmış Almanya, İngiltere, Norveç, İsveç, İtalya, Hollanda ve Fransa ülkelerinin karar verme birimleri olarak seçilmeleriyle, yenilenebilir enerji kullanımındaki göreceli etkinliklerinin VZA ile değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Yaşam standardı ve hizmet kalitesinin, üretim kalitesi ve miktarının düşüşüne yol açmadan enerji tüketiminin azaltılması etkinlik olarak değerlendirilir. Bu kapsamda; çalışmada ülkelerin yenilenebilir enerji kullanımında etkinlik ölçümünün doğru sağlanması için, girdi değişkenleri arasında yenilenebilir enerji tüketimi ve birincil enerji tüketimi kullanılmıştır.

Çalışma ile literatüre çalışılan karar verme birimlerinin (KVB), veri yıllarının ve girdi çıktılarının farklılığı konusunda katkı sağlanacaktır. Literatürde yer alan çalışmalara göre; yatırım, tüketim ve sermaye göz önünde bulundurulmuş bu kapsamda farklı girdi çıktılar ile çalışılmıştır. Yöntem olarak VZA’nın girdi ve çıktı yönelimli Charnes-Cooper-Rhodes (CCR) ve Banker, Charnes ve Cooper (BCC) modelleri kullanılıp modeller arasında sonuçlar analiz edilmiştir [4,12].

Çalışma altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde konuya yapılan girişten sonra ikinci bölümde literatür taraması bulunmaktadır. Üçüncü bölümde çalışmanın yöntemi olan VZA hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde araştırmanın yöntemi ve beşinci bölümde bulgular sunulmuştur. Çalışmanın altıncı bölümü olan son bölümde de sonuç bulunmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE SURVEY)

Bu bölümde yenilenebilir enerji sektöründe Türkiye’de yapılan çalışmalar ile yenilenebilir enerji sektöründe VZA ile ilgili yapılan çalışmalar sunulmuştur.

Türkiye’de yenilenebilir enerji sektöründe yapılan çalışmalar incelendiğinde aşağıdaki çalışmalar göze çarpmaktadır. Hepbaşlı ve Utlu (2004) tarafından yapılan çalışmada Türkiye’nin yenilenebilir enerji kaynakları, verimli kullanımı ve bu konu hakkında geliştirilebilecek politikalar incelenmiştir [13]. Gençoğlu tarafından 2002 yılında yapılan çalışmada Türkiye’nin sahip olduğu yenilenebilir enerji kaynakları incelenerek mevcut durum ve bu kaynakların daha verimli kullanılabilme imkânları sunulmuştur [14]. Diğer bir çalışmada da araştırmacı yenilenebilir enerji kaynakları arasında jeotermal enerjinin yerini ve Türkiye açısından önemini araştırmıştır [15]. Erdal (2012) yaptığı çalışmada Türkiye’deki yenilenebilir enerji yatırımları ve bu yatırımların istihdam yaratma potansiyelini rapor etmişlerdir [16]. 2012 yılında yapılan bir diğer çalışmada da Çapık ve diğerleri Türkiye’nin mevcut enerji kaynaklarının potansiyelini araştırmış ve sonuç olarak mevcut enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji ile giderilebileceğini belirtmiştir. Bu doğrultuda Türkiye’nin yenilenebilir enerji politikalarını incelemişlerdir [17]. Koç ve Kaya (2015) çalışmalarında Türkiye ve dünyadaki yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili genel bir değerlendirmeler ile üretim durumları hakkında bilgilendirmeler yapmışlardır [2].

Literatürde, yenilenebilir enerji alanında verimlilik analizini ve alternatif yenilenebilir enerji kaynağı teknolojilerinin verimlilik analizini değerlendirmek amacıyla VZA yöntemini kullanan çalışmalar göze çarpmaktadır. Halkoz ve Tzeremes (2012) VZA yöntemini kullanarak Yunanistan’ın yenilenebilir enerji sektörünü analiz etmişlerdir. Firmaların sermaye yapısını, faaliyetlerini ve likidite seviyelerini yakalamak için borç/eşitlik oranı, aktif devir hızı ve cari oran olmak üzere üç girdiyi buna ek olarak dört çıktıyı (brüt kar marjı, faaliyet kar marjı, öz kaynak getirisi, aktif karlılık) firmaların karlılık düzeylerini yakalamak için kullanmışlardır. Çalışma sonucunda rüzgâr enerjisi sektöründe faaliyet gösteren firmaların, hidroelektrik enerjisinde çalışanlardan daha yüksek bir finansal verimliliğe sahip olma eğiliminde olduklarını ve Yunanistan yenilenebilir enerji sektörünün rekabet gücü yüksek bir sektör olduğunu rapor etmişlerdir [18]. Menegaki (2013) de VZA modeli ile 31 Avrupa ülkesinin enerji verimsizliklerini dikkate almıştır. Çalışmada

kullanılan değişkenler gayri safi yurtiçi hasıla, yakıt tüketimi, karbondioksit emisyonları, istihdam ve sermayedir. Yenilenebilir enerjide geride kalan ülkelerin teknik olarak Avrupa’nın en verimli ülkeleriyle önemli yenilenebilir enerji performansına sahip ülkelerin teknik olarak orta veya düşük verimliliğe sahip olduklarına dikkat çekmişlerdir [19]. Kim ve diğerleri de (2015) Kore’de yenilenebilir enerjinin yatırım verimliliğini VZA aracılığıyla değerlendirmişler ve rüzgâr gücünün en verimli yenilenebilir enerji olduğu sonucuna varmışlardır [20].

3. VERİ ZARFLAMA ANALİZİ (VZA) MODELİ (DATA ENVELOPE ANALYSIS MODEL)

VZA, tamamı gözlenen verilere dayalı olarak etkinlik değerlendirmesi yapan doğrusal programlama yaklaşımıdır. Etkinlikler belirlenen KVB ve girdi çıktı analizleri ile yapılır. Bu yaklaşım ile en iyi örneğe dayanan etkin üretim sınırı oluşur ve KVB’ler arasında kıyaslama yapılabilir.

VZA modelleri üretim sürecinin tanımına göre “girdiye yönelik” (input oriented) veya “çıkıya yönelik” (output oriented) olarak oluşturulabilirler. “Girdiye yönelik” ile anlatılmak istenen; belirli bir çıktıyı en az girdi kullanarak üretmeye gayret etmektir. Girdi yönelimli modellerde, çıktıların dokunulmaksızın girdilerin minimize edilmesi söz konusudur. Çıktı yönelimli modellerde ise belirli bir girdi bileşimiyle en fazla çıktının üretilmesi hedeflenmektedir. Bu nedenle çıktıya yönelik modellerde girdilere müdahale edilmeksizin çıktıların artırılması söz konusudur. [12].

Üretim birimlerinin etkinlik ölçümlerinde, üretim yapmakta oldukları ölçek türü de, etkinlik ölçümünde kullanılacak VZA modelinin türünün belirlenmesinde önem taşımaktadır. Örneğin CCR model ölçeğe göre sabit getiriyi esas almaktadır. Bir birimlik girdi değişimi, çıktıda da bir birimlik değişime neden olmaktadır. BCC modeli ise ölçeğe göre değişken getiriyi esas almaktadır. BCC model, CCR modele konvekslik kısıtı eklenmesi ile türetilmiştir. Konvekslik kısıtı, CCR modelin, orijini en kuzeybatıdaki birim ile birleştiren etkin sınırının, orijinden geçme zorunluluğunu gevşeterek, BCC etkin sınırının karar birimlerini CCR etkin sınırına göre daha sıkı zarflamasına neden olmaktadır. Daha sıkı bir zarf ile ifade edilen BCC etkin sınırı, CCR etkin sınırına nazaran karar birimlerine daha yakın bir konumdadır [12].

Charnes vd. (1978) tarafından geliştirilen ilk model [4] kesirli programlama modelidir ve çözümü oldukça zordur. Bu nedenle, model yeniden düzenlenerek doğrusal programlama (DP) modeline dönüştürülmüştür [21]. Kısıt sayısının az olması ve yöneticilere önemli bilgiler sağlaması nedeniyle DP modelinin dual formu incelenerek zarflama modeli oluşturulmuştur [21].

VZA girdi ve çıktı odaklı BCC ve CCR modellerine ait matematiksel denklemler aşağıda verilmiştir.

$$j = 0, 1, \dots, n$$

$$r = 1, 2, \dots, s$$

$i=1,2,\dots,m$

j : karar birimleri

r : çıktılar

i : girdiler

y_{rj} : j . karar biriminin kullandığı r çıktısı miktarı

x_{ij} : j . karar biriminin kullandığı i girdisinin miktarı

θ : etkinlik skoru

λ : karar birimleri üzerindeki ağırlıklar yani yoğunluk vektörü olmak üzere;

Girdi yönlü CCR modeline ilişkin zarflama modeli eşitlik (1) deki gibidir:

$\min \theta$

Kısıtlar:

$$\begin{aligned} \theta_0 x_{i0} - \sum_{j=1}^n (x_{ij} \lambda_j) &\geq 0 \\ \sum_{j=1}^n (y_{rj} \lambda_j) &\geq y_{r0} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\lambda_j \geq 0,$$

$$i=1,2,\dots,m, r=1,2,\dots,s, j=1,2,\dots,n$$

Çıktı yönlü CCR modeline ilişkin zarflama modeli eşitlik (2) deki gibidir:

$\max \theta$

Kısıtlar:

$$\begin{aligned} x_{i0} - \sum_{j=1}^n (x_{ij} \lambda_j) &\geq 0 \\ \sum_{j=1}^n (y_{rj} \lambda_j) &\geq \theta y_{r0} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\lambda_j \geq 0,$$

$$i=1,2,\dots,m, r=1,2,\dots,s, j=1,2,\dots,n$$

biçimindedir.[21]

Girdi yönlü BCC modeline ilişkin zarflama modeli eşitlik (3) deki gibidir:

$\min \theta$

Kısıtlar:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j &\leq \theta x_{i0} \\ \sum_{j=1}^n (y_{rj} \lambda_j) &\geq y_{r0} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\lambda_j \geq 0, i=1,2,\dots,m, r=1,2,\dots,s, j=1,2,\dots,n$$

Çıktı yönlü BCC modeline ilişkin zarflama modeli eşitlik (4) deki gibidir [21]:

$\max \theta$

Kısıtlar:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j &\leq x_{i0} \\ \sum_{j=1}^n (y_{rj} \lambda_j) &\geq \theta y_{r0} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\lambda_j \geq 0, i=1,2,\dots,m, r=1,2,\dots,s, j=1,2,\dots,n$$

4. YÖNTEM (METHOD)

VZA, ülkelerin yenilenebilir enerji yatırımı ve tüketimi alanında etkinliklerinin ölçülmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada da, Türkiye ve gelişmiş Avrupa ülkelerinin yenilenebilir enerji verimliliğini analiz etmek amacıyla parametrik olmayan bir yöntem ve güçlü bir kıyaslama aracı olan VZA kullanılmıştır. Yerelde teknik etkinlik ve genelde teknik etkinlik ölçümü ve modeller arasında tutarlılığın sağlandığını göstermek amacıyla CCR girdi-çıkıtı ile BCC girdi-çıkıtı modelleri üzerinde çalışılmıştır. CCR modeli toplam teknik etkinliği bir bütün olarak hesaplarken, BCC modeli ise, teknik etkinliği ve ölçek etkinliğini ayırarak hesaplama yapma imkânı sağlamaktadır [12].

VZA'da kullanılan girdi ve çıktı odaklı CCR ve BCC modelleri üç girdi ve bir çıktı değişkeninden oluşturulmuştur. Girdi değişkenleri yenilenebilir enerji alanında yapılan yatırım, yenilenebilir enerji tüketimi ve birincil enerji tüketimidir. Çıktı değişkeni ise GSYH'dir. Literatürde yer alan birçok çalışmada, enerji girdisinin performans analizlerinde dikkate alınması gerektiği ifade edilmektedir. Bu sebeple enerji tüketimi ve enerji alanında yapılan yatırım miktarları, bir ülkenin enerji dinamiğinin performans analizinde girdi olarak kullanılırken, bu girdiler ülkenin ekonomik çıktısı GSYH için temel girdiler olarak düşünülebilir. Literatürde yapılan çalışmalarda seçilmesi gereken girdi ve çıktılar konusunda bir fikir birliği bulunmamakla beraber modeldeki girdi ve çıktılar çalışmadaki karar birimlerini karşılaştırmanın temelini oluşturur. Çalışmada gelecek planlaması için ölçeğe göre sabit getiri varsayımı altında yani bütün KVB'lerin optimal ölçekte faaliyet gösterdikleri varsayımına dayanarak, görece toplam etkinliklerin hesaplanmasında kullanılan girdi yönelimli CCR model, diğer VZA çıktı yönelimli CCR ve girdi ve çıktı yönelimli BCC modelleriyle kıyaslanacak, etkin olmayan KVB'ler belirlendikten sonra etkin hale getirmek için referans KVB'ler belirlenecek, bunlardan yola çıkarak etkin olmayan KVB'ler için iyileştirme önerileri yapılacaktır.

2015 ve 2016 yıllarını kapsayan veri setleri Dünya Bankası ve İngiliz Petrol (İP)'nin yayınladıkları yıllık bültenlerden derlenmiştir [22-25].

5. BULGULAR (RESULTS)

Bu bölümde verilerin analizi ve değerlendirilmesi sonucu elde edilen bulgular sunulacaktır.

Aynı karar birimi için farklı girdi ve çıktı grupları farklı etkinlik değerleri üreteceğinden üretim sürecine nedensel olarak bağlı, anlamlı girdi ve çıktılarının belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu doğrultuda çalışmada kullanılan yatırım, birincil enerji tüketimi, yenilenebilir enerji tüketimi, GSYH girdi ve çıktılardan elde edilen 2015 ve 2016 yılları ortalamaları alınarak modellerde

kullanılan değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Buradaki amaç, modellerde kullanılan girdi ve çıktılar arasındaki ilişkinin yönü ve boyutu hakkında fikir sahibi olmaktır.

kullanılan GSYH üzerinde belirgin bir kontrol mekanizmalarının olmayışıdır. Çıktı yönlü modeller kullanılması nedeniyle diğer modellerle tutarlılığın sınırlanması istenmesidir.

Çizelge 1. Korelasyon analizi sonuçları (Results of correlation analysis)

| | Yatırım | Birincil Enerji Tüketimi | Yenilenebilir Enerji Tüketimi | GSYIH | |
|-------------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------------|--------|---|
| Yatırım | Pearson Korelasyon | 1 | | | |
| | Sig. (2-tailed) | | | | |
| | N | | | | |
| Birincil Enerji Tüketimi | Pearson Korelasyon | ,594 | 1 | | |
| | Sig. (2-tailed) | ,121 | | | |
| | N | 8 | | | |
| Yenilenebilir Enerji Tüketimi | Pearson Korelasyon | ,678 | ,834* | 1 | |
| | Sig. (2-tailed) | ,065 | ,010 | | |
| | N | 8 | 8 | | |
| GSYIH | Pearson Correlation | ,763* | ,942** | ,850** | 1 |
| | Sig. (2-tailed) | ,028 | ,000 | ,008 | |
| | N | 8 | 8 | 8 | |

Çizelge 1’de SPSS paket programı ile elde edilen korelasyon katsayıları 2015-2016 yıllarına ait verilerin ortalamaları kullanılarak elde edilmiştir. Çizelge 1’e göre çıktı olarak kullandığımız GSYH ile birincil enerji tüketimi çok yüksek (0,94) bir ilişkiye sahiptir. GSYH ile yatırım değerleri orta dereceli (0,76) ilişkiye sahiptir. Yenilenebilir enerji tüketimi ise birincil enerji tüketimi (0,83) ve GSYH (0,85) ile yüksek ilişkiye sahiptir. Tüm girdi çıktılar arasındaki ilişkilerin orta seviyenin üzerinde ayrıca, tüm değişkenlerin birbiriyle pozitif korelasyona sahip olduğu Çizelge 1 incelendiğinde görülmektedir.

5.1. Verilerin Analizi ve Değerlendirilmesi

(Analysis and Evaluation of Data)

Çalışmada CCR ve BCC modellerinin girdi-çıkıtı yönlü modelleri kullanılarak, Türkiye ve diğer 7 Avrupa ülkesinin 2015 ve 2016 yılları içerisinde teknik ve ölçek etkinlikleri ölçülmüştür. Girdi yönlü modeller kullanılması nedeniyle ülkelerin yenilenebilir enerji politikalarını belirlerken çalışmada çıktı olarak

iki farklı VZA modeli kullanılması amaç, BCC modelinin karar birimlerinin saf teknik etkinliğini ölçmesi, CCR modelinin ise genel teknik etkinliği ölçmesidir. VZA uygulamasının çözümünde GAMS yazılım paket programı kullanılmıştır. Geliştirme sonrası elde edilen sonuçlar her model için aşağıda yer alan Çizelge 2 ve 3’te verilmiştir.

Çizelge 2 ve 3 incelendiğinde; 2015 ve 2016 yıllarında Türkiye yenilenebilir enerji alanında Avrupa’nın 2020 hedeflerine ulaşmış ülkeleri ile kıyaslandığında sayısal olarak yatırım, tüketim ve GSYH açısından geride kalmış, 2015 ve 2016 yılları içerisinde Türkiye’nin etkin olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, veriler arasında kıyas yapıldığında Türkiye’nin yenilenebilir enerji tüketiminin refah ülkeler seviyesinde olmadığı ve yenilenebilir enerji yatırımlarının gerektiği oranda yapılmadığı söylenebilir.

Çizelge 2. 2015 yılı verilerine ait etkinlik sonuçları (Efficiency results of the data of 2015)

| | Girdi Yönelimli CCR Yöntemi | Girdi Yönelimli BCC Yöntemi | Çıktı Yönelimli CCR Yöntemi | Çıktı Yönelimli BCC Yöntemi |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| İngiltere | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| Almanya | 0.8056 | 1.0000 | 1.2413 | 1.0000 |
| Fransa | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| Norveç | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| İtalya | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| İsveç | 0.7612 | 1.0000 | 1.3137 | 1.0000 |
| Türkiye | 0.6630 | 0.6674 | 1.5082 | 1.5070 |
| Hollanda | 0.8811 | 0.9299 | 1.1350 | 1.0815 |

Çizelge 3. 2016 yılı verilerine ait etkinlik sonuçları(Efficiency results of the data of 2016)

| | Girdi Yönelimli CCR Yöntemi | Girdi Yönelimli BCC Yöntemi | Çıktı Yönelimli CCR Yöntemi | Çıktı Yönelimli BCC Yöntemi |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| İngiltere | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| Almanya | 0.8463 | 1.0000 | 1.1816 | 1.0000 |
| Fransa | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| Norveç | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| İtalya | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| İsveç | 0.7815 | 1.0000 | 1.2796 | 1.0000 |
| Türkiye | 0.6040 | 0.8933 | 1.6557 | 1.2669 |
| Hollanda | 0.8701 | 1.0000 | 1.1493 | 1.0000 |

CCR modelleri ülkelerin saf teknik etkinlik skorlarını benzer ölçekte olmayan ülkelerle kıyaslama yaptığı için düşük çıkarabilmektedir. Eğer ülke ölçek olarak kendisinden daha etkin bir ülkeyle kıyaslanırsa söz konusu ülkenin etkinlik skoru düşük çıkacaktır. Öte yandan, BCC varsayımı altında, ülkeler ölçek olarak nispeten benzer yapıdaki ülkelerle kıyaslanmaktadır. Bu nedenle BCC varsayımı altındaki teknik etkinlik skorları CCR varsayımına göre ya daha yüksek çıkmakta ya da aynı olmaktadır [26]. Bu kapsamda BCC modelinde etkin çıkan bir ülke CCR modelinde etkin çıkmıyorsa, o ülke kendine benzer ülkeler arasında etkin çalışmakta ancak genel olarak etkin çalışmamaktadır.

Bu nedenle; Almanya, İsveç ve Hollanda'nın BCC modellerinde etkin olup, CCR modellerinde etkin olmamaları bu ülkelerin yenilenebilir enerji yatırımları ve tüketimleri noktasında kendine benzer ülkeler arasında etkin olduklarını ancak genel olarak etkin çalışmadıklarını göstermektedir. Türkiye'nin de etkinlik yüzdelerine bakıldığında, genel politikalarına göre, teknik olarak uyguladığı politikaların başarı yüzdesinin daha iyi olduğu söylenebilir. İngiltere, Fransa, İtalya ve Norveç hem 2015 hem de 2016 yıllarında teknik ve genel etkindirler.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Avrupa ülkelerinden 2020 yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşmış ülkeler ile Türkiye'nin yenilenebilir enerji alanında etkinliğini ölçmek için Veri Zarflama Analizi ile etkinlik analizi yapılmıştır. Çalışma verileri Dünya Bankası ve BP enerji verileri derlenerek elde edilmiş olup, 2015 ve 2016 yıllarını kapsamaktadır. Karar Verme Birimleri olarak seçilen ülkeler İngiltere, Almanya, Fransa, Norveç, İtalya, İsveç, Hollanda ve Türkiye'dir. Çalışma ile Türkiye'nin Dünya liderleri ile kıyaslandığında yenilenebilir enerji etkinliğinin kıyaslanması sağlanmış, bu kapsamda önerilerde bulunulmuştur. Çalışma kapsamında etkinlik ölçümü veri zarflama analizi ile sağlanmış olup girdi olarak yıllık yenilenebilir enerji yatırımları, birincil enerji tüketimi ve yenilenebilir enerji tüketimi, çıktı olarak ise gayri safi yurt içi hasıla modele eklenmiştir.

Sonuçlara göre; CCR teknik etkinlik skorlarıyla BCC teknik etkinlik skorları arasında çok yüksek farklılıklar görülmemesi, yenilenebilir enerji alanında kıyaslanan ülkelerin ölçek olarak etkin olabileceklerini göstermektedir.

Yapılan analizlere göre, her iki yılda, etkin olan ülkelerin, elindeki girdi ve çıktıları her yıl diğer ülkelere göre optimum düzeyde kullandığı anlaşılmaktadır. Yani bu ülkeler optimum ölçek büyüklüğünde ya da civarında faaliyet göstermektedir. Ülkelerin faaliyet ölçeği arttıkça CCR ve BCC skorları artmaktadır. Yani faaliyet ölçeğiyle CCR ve BCC skorları arasında pozitif bir ilişki vardır.

Sonuçlara göre, genel anlamda ülkelere CCR ve BCC modelleri temelinde yenilenebilir enerji yatırımı ve tüketimi performanslarında birkaç ülke hariç belli bir istikrar yakalayabildikleri görülmüştür. Bu durum ülkelerin etkinlik artışının tutarlı bir şekilde devam edeceğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, geleceğe yönelik genel teknik verimliliği sağlamak için özellikle verimsiz ülkelerde yenilenebilir enerji alanında yapılacak düzenlemelerle yatırım kararları uygulanmalıdır.

Enerji Bakanlığı 2023 yılında; rüzgâr enerjisindeki kurulu gücü 20.000 megawatt (MW), güneş enerjisinde 3000 MW, jeotermal enerjide 600 MW olarak hedeflemektedir. Avrupa ülkelerinde olduğu gibi, Türkiye'de de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında uygulanacak olan yasal mevzuatlara özellikle güneş ve biyokütle enerji üretiminde özen gösterilmelidir. Avrupa ülkelerinde her enerji tipi için ayrı mevzuat oluşturulurken, Türkiye'de yenilenebilir enerji mevzuatı tek bir mevzuat ile desteklenmektedir. Yenilenebilir enerjide ilgili enerji kaynağına özel düzenlemeler yapılmalıdır. Bu alanda üretim, tüketim, yatırım ile ilgili mevzuatın zenginleştirilip, teşviklerin artırılması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan girdilerin tüketim ve yatırıma dayalı olması ve bunlardan elde edilen sonuçlar; Türkiye'nin yatırım ve tüketim hedeflerine yönelmesi gerektiğini göstermektedir.

Endüstriyel alanda uygulanabilecek enerji tasarrufu yöntemleri birincil ve yenilenebilir enerji kaynakları tüketiminde dikkate alınabilir. Teknik ve idari ekiplerin

bu tasarruf metotlarını öğrenip uygulamaya almaları ile enerji tüketimlerinde önemli azalmalar sağlanabilir. Enerji tasarrufu sayesinde daha az fosil yakıt yakılması sağlanarak, istenmeyen emisyonlar azalacak ve karbon emisyonunun sebep olduğu küresel ısınma etkileri de azalacaktır.

Gelecek çalışmalar için, ilişki durumu pozitif yönde yüksek, farklı girdi çıktıları ve farklı ancak homojen yapıdaki KVB'ler ile performans kıyaslamaları önerilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Dağistan, H. "Yenilenebilir Enerji ve Jeotermal Kaynaklarımız", *Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Türkiye 10. Enerji Kongresi*, 74, Ankara :EMO. (2006).
- [2] Koç, E. ve Kaya, K., "Enerji Kaynakları-Yenilenebilir Enerji Durumu", *Mühendis ve Makine*, 56 (668): 36-47, (2014).
- [3] Farrell, M. J. 'The Measurement of Productive Efficiency', *Journal of the Royal Statistical Society*, 120(3), 253-290, (1957).
- [4] Charnes, W.W. Cooper, E. Rhodes. "Measuring the efficiency of decision making units", *European Journal of Operational Research*, 2: 429-444, (1978).
- [5] Bal, H., Örkçü, H.H., "Combining the Discriminant Analysis and the Data Envelopment Analysis In View Of Multiple Criteria Decision Making: A New Model", *G.U. Journal of Science*, 18(3):355-364, (2005).
- [6] Jha, D.K., Shrestha, R., "Measuring Efficiency of Hydropower Plants in Nepal Using Data Envelopment Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(4):1502-1511, (2006).
- [7] Chien, T., Hu, J. "Renewable energy and macro economic efficiency of OECD and non-OECD economies", *Energy Policy*, 35(7): 3606-3615 (2007).
- [8] Barros, C. "Efficiency analysis of hydroelectric generating plants: A case study for Portugal", *Energy Economics*, 1: 59-75, (2008).
- [9] Sözen, A., Alp, I., Özdemir A. "Assessment Of Operational And Environmental Performance Of Thermal Power Plants In Turkey By Using Data Envelopment Analysis", *Energy Policy*, 38(10): 6194-203, (2010).
- [10] San Cristóbal, J. R. "A multi criteria data envelopment analysis model to evaluate the efficiency of the Renewable Energy technologies", *Renewable Energy*, 36(10): 2742-2746, (2011).
- [11] Sözen, A., Alp, İ., Kilinc, C. "Efficiency Assessment Of The Hydro-Power Plants In Turkey By Using Data Envelopment Analysis", *Renewable Energy*, 46: 92-202, (2012).
- [12] Banker, R.D., Charnes, A. Cooper, W.W. "Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis", *Management Science*, 30: 1078- 1092, (1984).
- [13] Hepbaşlı, A., Utlü, Z. "Evaluating The Energy Utilization Efficiency Of Turkey's Renewable Energy Sources During 2001", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(3): 237-255, (2004).
- [14] Gençoğlu, M. T., "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Açısından Önemi", *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14 (2): 57-64, (2002).
- [15] Külekçi, Ö.C. "Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Jeotermal Enerjinin Yeri ve Türkiye Açısından Önemi", *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 2(2): 83-91, (2009).
- [16] Erdal, L. "Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Yatırımları Ve İstihdam Yaratma Potansiyeli", *Sosyal Ve Beşeri Bilimler Dergisi*, 4(1): 171-181, (2012).
- [17] Çapık, M., Yılmaz, A.O., Çavuşoğlu, İ. "Present situation and potential role of renewable energy in Turkey", *Renewable Energy*, 46: 1-13, (2012).
- [18] Halkos, G.E., Tzeremes, N.G. "Analyzing the Greek renewable energy sector: A Data Envelopment Analysis Approach", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 2884- 2893, (2012).
- [19] Menegaki, A. N. "Growth and renewable energy in Europe: Benchmarking with data envelopment analysis", *Renewable Energy*, 60: 363-369,(2013).
- [20] Kim, K.-T., Lee, D. J., Park, S.-J., Zhang, Y., Sultanov, A. "Measuring the efficiency of the investment for renewable energy in Korea using data envelopment analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47: 694-702, (2015).
- [21] Cooper, W.W., Seiford, L.M., Tone, K., "Data Envelopment Analysis", Kluwer Academic Publishers, Boston, USA (2000).
- [22] İnternet: BP, "BP Statistical Review of World Energy June 2017", <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/en-ergy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>, 20 Mayıs 2018.
- [23] İnternet: The World Bank, <http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=world-development-indicators&Type=TABLE&preview=on>, 21 Mayıs 2018.
- [24] İnternet: Frankfurt School, "Global Trends In Renewable Energy Investment 2017", <http://fs-unep-centre.org/sites/default/files/publications/globaltrendsinnrenewableenergyinvestment2017.pdf>, 20 Mayıs 2018.
- [25] İnternet: Frankfurt School, "Global Trends In Renewable Energy Investment 2018", <http://fs-unep-centre.org/sites/default/files/publications/gtr2018v2.pdf>, 20 Mayıs 2018.
- [26] Coelli, T. J., Rao, D. S. P., O'Donnell C. J., Battese, G. E. An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis. Second Edition, Springer, New York (2005)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Some technological properties of scotch pine (*Pinus Sylvestris* Lipsky) and eastern beech (*Fagus Orientalis* Lipsky) woods impregnated with alpha-X chemical

*Alfa-X kimyasalı ile emprenye edilmiş sarıçam (*Pinus Sylvestris* Lipsky) ve doğu kayını (*Fagus Orientalis* Lipsky) odunlarının bazı teknolojik özellikleri*

Yazar(lar) (Author(s)): Ali Talha AYHAN¹, Murat ÖZALP²

ORCID¹: 0000-0001-7882-3646

ORCID²: 0000-0003-1651-3487

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Ayhan A.T., Özalp M., “Some technological properties of scotch pine (*pinus sylvestris lipsky*) and eastern beech (*fagus orientalis lipsky*) woods impregnated with alpha-X chemical”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 871-877, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.481589

Some Technological Properties of Scotch Pine (*Pinus Sylvestris* Lipsky) and Eastern Beech (*Fagus Orientalis* Lipsky) Woods Impregnated with Alpha-X Chemical

Araştırma Makalesi / Research Article

Ali Talha AYHAN, Murat ÖZALP*

Kütahya Dumlupınar University, Simav Technology Faculty, Department of Wood Products Engineering,
43500, Simav – Kütahya, Turkey

(Geliş/Received : 12.11.2018; Kabul/Accepted : 27.11.2018)

ABSTRACT

This study was performed for the purpose of determining the technological properties of Scotch pine (*Pinus sylvestris* Lipsky) and Eastern beech (*Fagus orientalis* Lipsky) woods impregnated with Alpha-X chemicals. The impregnation solution was prepared at 10 % and 20 % concentrations. Alfa-X, a flame-retardant chemical formerly applied to textiles and laminate parquet, was used for the first time in wood work. As a result of the combustion tests, Alfa-X reduced the initial weight loss temperature of the wood material in both samples. However, it has completely raised the combustion temperature gradients in both samples. It is observed that ending temperature increased in eastern beech wood and in scotch pine wood by 117 °C and 50 °C, respectively, with increasing the rate of Alfa-X added into impregnation solution from 0 % to 20 % at deterioration. In addition, the bending and compression strength values of the Scotch pine and Eastern beech wood samples were also examined.

Keywords: Alfa-X, combustion properties, bending strength, compression strength, woods.

Alfa-X Kimyasalı ile Emprenye Edilmiş Sarıçam (*Pinus Sylvestris* Lipsky) ve Doğu Kayını (*Fagus Orientalis* Lipsky) Odunlarının Bazı Teknolojik Özellikleri

ÖZ

Bu çalışma, Alfa-X kimyasalı ile emprenye edilmiş Sarıçam (*Pinus sylvestris* Lipsky) and Doğu kayını (*Fagus orientalis* Lipsky) odununun bazı teknolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Emprenye çözeltisi %10 ve %20 konsantrasyonda hazırlanmıştır. Daha önce tekstil ve laminat parke uygulamalarında kullanılan Alfa-X yanmayı geciktirici kimyasalı, solid odunda ilk kez bu çalışmada kullanılmıştır. Yanma testleri sonucunda, Alfa-X ilk ağırlık kaybı sıcaklığını her iki ağaç türünde de düşürmüştür. Ancak, Yanmanın sonlandığı sıcaklık derecesini her iki ağaç türünde de artırmıştır. Alfa-X oranının %0'dan % 20' ye çıkmasıyla Sarıçamda 117°C, Kayında 50°C'lik bir artış gözlenmiştir. Ayrıca, Sarıçam and Doğu kayını odununun eğilme direnci ve basınç direnci değerleri de incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alfa-X, yanma özellikleri, eğilme direnci, basınç direnci, odun.

1. INTRODUCTION

Wood is among of the most important raw materials that human has been using since the early ages. Along with the world's technological improvements, the usage areas of wood materials have been diversified and the amount used has increased. Wood material is flammable and tends to burn at high temperatures. The negative properties of wood materials related to burning can be reduced by some protective measures and impregnation techniques [1, 2]. Other negativities of wood materials other than burning cause only material loss, while vital hazards also occur in the case of wood material burning

Flames and gases that form in the burning of wood materials can threaten human life and cause deaths [3]. Wood is a burning substance. Therefore, in order to increase the resistance to burning of wood, it is imperative for many uses that it is impregnated with chemical substances [4, 5]. The higher the treatment temperature the better the wood's biological durability. However, at over 150°C the strength decreases by 10%-30%. Therefore, use of heat-treated wood in load-bearing constructions is restricted [6, 7]. Characterized by organic polymer, a wide range of materials from wood to fabric is typically available to ASTM E 162, and flame spread, and smoke density tests were applied. As a result of the experiments, the surface-free hard fiber board (HDF), Meranti plywood and PVC coating provide the

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : murat.ozalp@dpu.edu.tr

best possible ignition-proof materials [8]. Plywood, chipboard, and fiberboard (MDF) materials are 1, 2, and 3 times fire retardant via brushing technique with chlorinated rubber paint and were subjected to a burning test. Then, we assessed their rates. As a result, with three layers of paint, the applied flake burning resistance is most visible; with one coat of paint, the applied MDF showed the least resistance against burning [9]. The improving fire retardants of textile materials also was examined. Boric acid borax and zinc borate from boron compounds with three different ratios (5%, 7.5%, and 10%) were added to chemical Alfa-x in a ratio (50%). Besides another two compounds were prepared from Alfa-x in ratios (50% and 100%). In total, we prepared 11 different solvents. Application of solvents to the fabrics were made by a lab pad machine. Fire retardants of fabrics of manufactured specimens were tested using a flammability test. The results showed that boron compounds improve the fire-retardant properties of textile fabrics. The most effective result was undertaken from 7.5% borax and 50% Alfa-x solvent [10]. High-density fiber boards contain a mixture of 50% beech and 50% Scotch pine, which are typically used for laminated floor boards. High-density fiber boards, with a thickness of 6.5 mm, were produced using flame-retardant chemicals. Fire retardants such as borax, boric acid, ammonium polyphosphate, and Alfa-x-chemicals were added in powder form with concentrations of 3%, 6%, and 9% of dry fiber weight. Afterward, surfaces of HDF boards were coated with overlay, decor, and balance sheets, and then laminated floorings boards were produced. The physical, mechanical, surface properties, amounts of free formaldehyde, resistance of fungal decay, and fire resistance of all produced laminated flooring samples were investigated in accordance to relevant standards. The addition of fire-retardant chemicals such as borax, boric acid, ammonium-polyphosphate, and Alfa-x, at 3%, 6%, and 9% proportions improved fire resistance, fungal decay, and mold resistance but had a negative effect on the physical and mechanical properties. It also was detected that the internal addition of fire-retardant chemicals had no negative effects on the surface quality of HDF boards, whereas the application of such chemicals on the melamine-impregnated papers had destructive effects on the surface properties of tested samples [11]. Thermal stability at low temperatures in wood components follows hemicelluloses, lignin, cellulose; at high temperatures, it follows this sequence: Hemicelluloses, cellulose, lignin. Hemicelluloses decompose thermally at 180°C -250°C, cellulose begins to decompose at 280°C and completely decomposes at 300°C-350°C, lignin begins to decompose at 300°C -350°C and completes decomposition at 400°C -450°C reported. In fast pyrolysis, flammable gases include methane with CO, methane, formaldehyde, and acetic acid. Phenolics, xylenols, guaiacols, cresols and catchall's which are aromatic moieties that are released as degradation products of laevoglucose (1,6-anhydro-beta-D-

glucopyranose) and lignin by cellulosic degradation, are also products of rapid pyrolysis. After completion of carbonization at 400°C -500°C and the removal of flammable gases, the charcoal remains [12].

This study was performed for the purpose of determining the combustion properties, bending and compression strength of Scotch pine and Eastern beech woods impregnated with alpha-x impregnation solution.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Wood materials

Scotch pine (*Pinus sylvestris* Lipsky) and Eastern beech (*Fagus orientalis* Lipsky) woods were selected as test the materials because of wide usage of industry. Special emphasis was given for the selection of wood materials which are nondeficient, proper, knotless, normally grown (without reaction wood, decay and mushroom damages) according to TS 2476 [13].

2.2. Alpha-X impregnation solution

In this study, Alfa-X was used as a combustion-retardant chemical. Test specimens prepared in dimensions of 13x13x76 mm were made according to the immersion method with 10%, and 20% Alfa-X impregnation solution for 48 hours.

The technical properties of the Alfa-x used in this study are given in Table 1.

Table 1. The technical properties of the Alpha-X chemicals

| | |
|------------------|--|
| Appearance | Dry powder |
| Color | White |
| Granuler size | <50 µm |
| pH | 3.74 |
| Relative density | 0.847 (g.cm ⁻³) |
| Odour | None |
| Storage | It should be stored in a cool and dry place and should be protected from moisture. |

The Alpha-X fire-retardant chemical is used as a complement to the polymer, and is added to the production processes of various products. It is used in thermoplastic, paint, cable, synthetic, membrane and wood-based boards. It is effective up to 1500 °C against flammability.

2.3. Methods

2.3.1. Bending strength

Bending strength tests were carried out according to TS 2474 standards (TS 2474) [14]. The samples having 2x2x30cm dimensions were used for bending strength. Thickness of layers is 6.5 mm. 10 samples have been used for each experiment. The samples prepared are climatized up to reach 12% moisture at 20°C and 65% relative humidity conditions. Test specimens are determined through measurement from the middle parts by ± 1% mm sensitivity micrometer. Span to thickness

ratio for bending is 24 cm. Bending strength test mechanism is given in Fig.1.

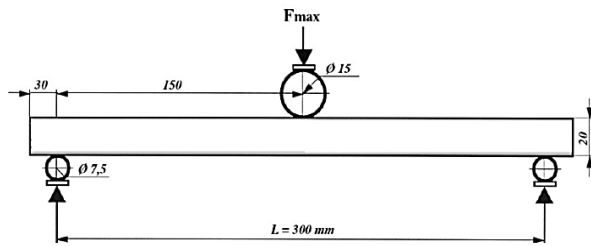


Figure 1. The dimensions of bending strength test specimens

Following eq.1 were used in the calculation of bending strength (σ_e);

$$\sigma_e = \frac{3.P.L_s}{2.b.h^2} \quad (1)$$

where, σ_e is bending strength ($N.mm^{-2}$); P is max. force at the moment of breaking (N); L_s is distance between points of support (mm); b is width of sample piece (mm); h is thickness of sample piece (mm).

2.3.2. Compression strength

Compression strength tests were carried out according to TS 2595 standards (TS 2595) [15]. The samples having 2x2x3 cm dimensions were used for bending strength. 10 samples have been used for each experiment. The samples prepared are climatized up to reach 12% moisture at 20°C and 65% relative humidity conditions. Test specimens are determined through measurement from the middle parts by $\pm 1\%$ mm sensitivity micrometer. Compression strength test mechanism is given in Fig. 2.

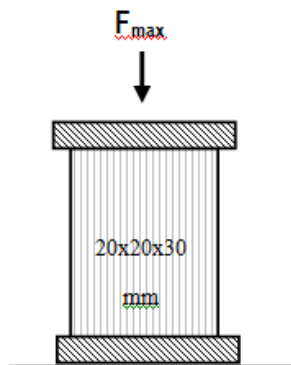


Figure 2. Compression strength test

Following Eq.2 were used in the calculation of compression strength (σ_b);

$$\sigma_b = \frac{F_{max}}{a.b} \quad (2)$$

where, σ_b is compression strength ($N.mm^{-2}$); F_{max} is maximum force at the moment of breaking (N); a is width of sample breadth cross-section (mm); b is length of sample breadth cross-section (mm).

2.3.3. Retention amount of lpha-X

The rough drafts for the preparation of test and control samples were cut from the sapwood parts of massive woods with a dimension of 20x20x500 mm and conditioned at a temperature of $20 \pm 2^\circ C$ and $65 \pm 3\%$ relative humidity till they reach 12% humidity distribution. The air-dry samples with a dimension of 13x13x76 mm were cut from the drafts for impregnation. The test specimens were impregnated according to ASTM D 1413-99 [16, 17]. Retention of impregnation chemical (R) was calculated by the following Eq.6 :

$$R = \frac{G.C}{V} 10^3 \text{ kg. m}^{-3} \quad (G = T_2 - T_1) \quad (3)$$

where, G is the amount of impregnation solution absorbed by the sample, T_2 is the sample weight after the impregnation, T_1 is sample weight before the impregnation, C is concentration (%) of the impregnation solution and V is the volume of the samples. Impregnated test samples were kept under a temperature of $20 \pm 2^\circ C$ and $65 \pm 3\%$ moisture content until they reach to a stable weight.

2.3.4. Combustion test

TGA analyses were carried out in ILTEM laboratory, Kutahya Dumlupinar University. TGA test device was shown in Figure 3.



Figure 3. TGA test device

2.4. Data Analyses

In this study, to determine significance of main effects and interactions multiple variance analysis (MANOVA) was carried out. When the differences between groups were found to be significant, Duncan’s Multiple Range test was used to determine the differences between means

at prescribed level of $\alpha = 0.05$ statistical values were then calculated by the SPSS 22.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Bending Strength Results

The values of average bending strength for Scotch pine and eastern beech wood are given in Table 2.

Table 2. The values of average bending strength results (N.mm⁻²)

| Samples | Wood Type | |
|------------|--------------------|------------------|
| | Eastern beech wood | Scotch pine wood |
| 1 | 75.32 | 79.59 |
| 2 | 66.80 | 74.38 |
| 3 | 74.45 | 86.80 |
| 4 | 79.76 | 75.82 |
| 5 | 74.94 | 72.61 |
| 6 | 69.46 | 76.54 |
| 7 | 70.81 | 77.07 |
| 8 | 77.88 | 82.01 |
| 9 | 68.57 | 79.76 |
| 10 | 81.07 | 82.91 |
| Average | 73.91 | 78.74 |
| σ_x | 4.86 | 4.31 |
| n | 10 | 10 |

The bending strength results of two wood species were compared with analysis of variance.

The results of the analysis of variance obtained are given in Table 3.

Table 3. Bending strength variance analysis results

| Variance sources | Df | Sum of squares | Mean squares | F test | P |
|------------------|----|----------------|--------------|--------|-------|
| Wood Type | 1 | 117.273 | 117.273 | 5.546 | 0.030 |
| Error | 18 | 380.619 | 117.273 | | |
| Total | 20 | 117015.637 | 21.145 | | |

According to the results of variance analysis conducted, the effects of wood type on the bending strength has been found significant with 5% of the error.

3.2. Compression Strength Results

The values of average compression strength for scotch pine and eastern beech wood are given in Table 4.

Table 4. The values of average compression strength results (N.mm⁻²)

| Samples | Wood Type | |
|------------|--------------------|-------------|
| | Eastern beech wood | Scotch pine |
| 1 | 34.22 | 35.82 |
| 2 | 35.85 | 36.07 |
| 3 | 36.28 | 35.79 |
| 4 | 35.45 | 35.61 |
| 5 | 36.09 | 37.24 |
| 6 | 35.89 | 35.82 |
| 7 | 36.13 | 36.39 |
| 8 | 34.97 | 37.88 |
| 9 | 37.34 | 37.21 |
| 10 | 35.64 | 38.63 |
| Average | 35.879 | 36.65 |
| σ_x | 0.82 | 1.03 |
| n | 10 | 10 |

The compression strength results of two wood species were compared with analysis of variance.

The results of the analysis of variance obtained are given in Table 5.

Table 5. Compression strength variance analysis results

| Variance sources | Df | Sum of squares | Mean squares | F test | P |
|------------------|----|----------------|--------------|--------|-------|
| Wood type | 1 | 3.698 | 3.698 | 4.204 | 0.055 |
| Error | 18 | 15.835 | 0.880 | | |
| Total | 20 | 26251.506 | | | |

According to the results of variance analysis conducted, the effects of wood type on the compression strength has not been found significant with 5% of the error.

3.3. Results of Weight Loss-Based Combustion Experiment

The results of TGA and DTGA measurements on samples taken from wood materials with the aim of determining the activity ratings of Alfa-X chemical substances and concentration ratios (0%, 10%, and 20%) used for combustion retardation purposes are shown in Figure 4,5, 6, 7, 8 and 9, respectively.

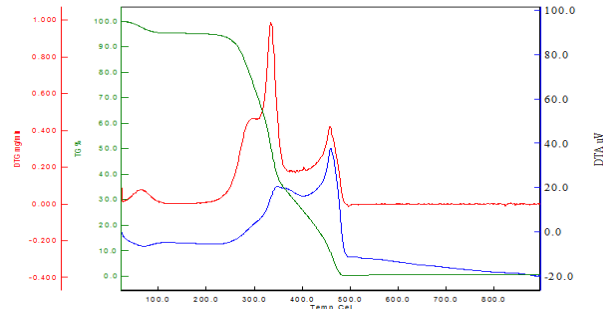


Fig. 4. Change values of weight loss on TGA result of 0% Alpha-x-doped eastern beech wood

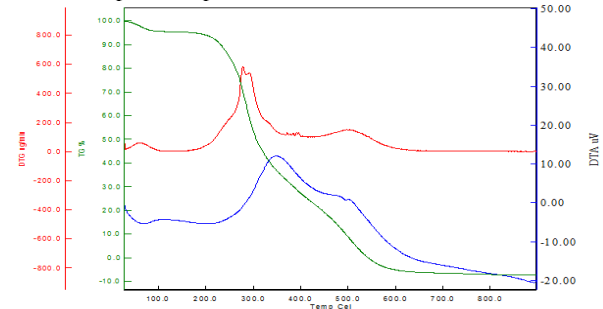


Fig. 5. Change values of weight loss on TGA result of 10% Alpha-x-doped eastern beech wood

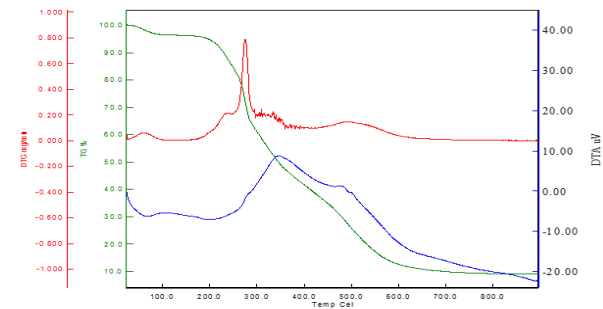


Fig. 6. Change values of weight loss on TGA result of 20% Alpha-x- doped eastern beech wood

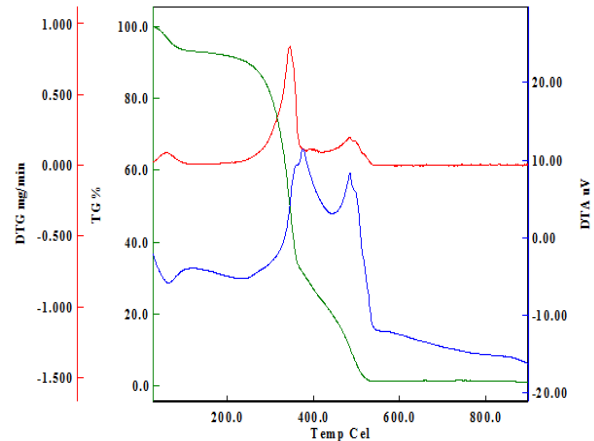


Fig. 7. Change values of weight loss on TGA result of 0% Alpha-x -doped scotch pine

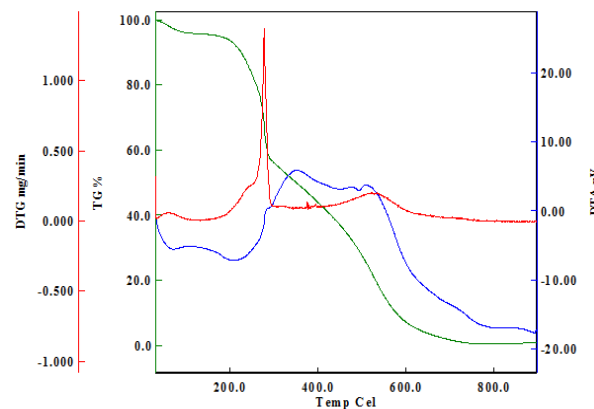


Fig. 8. Change values of weight loss on TGA result of 10% Alpha-x- doped scotch pine

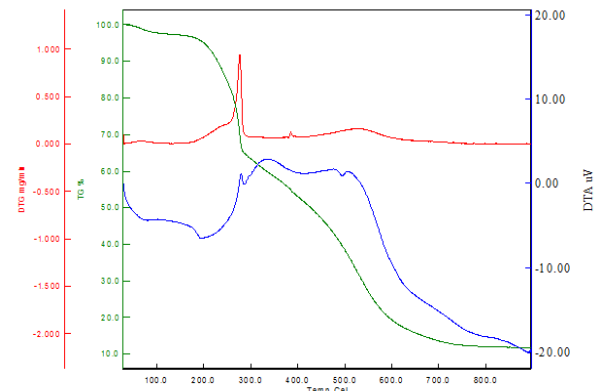


Fig. 9. Change values of weight loss on TGA result of 20% Alpha-x- doped scotch pine

At 10% and 20% Alfa-X added wood samples, the temperature at which the deterioration was finished was determined as 600°C and the same result was obtained in both species. The results obtained with 10% and 20%

Alfa-X-added wood samples showed better results than the 0% added samples. A summary of the data in Fig. 4, 5, 6, 7, 8 and 9 is given in Tab. 6.

Table 6. Summary evaluation of weight loss-based combustion test results

| Wood Types | Alpha-x addition ratio % | First deterioration temperature (°C) | First deterioration weight loss ratio (%) | Deterioration ending temperature (°C) |
|---------------|--------------------------|--------------------------------------|---|---------------------------------------|
| Eastern beech | Control | 230 | 94 | 483 |
| | 10 | 206 | 93.7 | 600 |
| | 20 | 208 | 93 | 600 |
| Scotch pine | Control | 246 | 88.8 | 550 |
| | 10 | 214 | 91 | 600 |
| | 20 | 198 | 94.3 | 600 |

3.4. Retention Values

Average values of total retention and retention % is given in Table 7.

Table 7. Average values of total retention and retention

| Wood Type | Alfa-X ratio (wt%) | Total retention (kg.m ⁻³) | Retention (%) |
|---------------|--------------------|---------------------------------------|---------------|
| Scotch pine | 10 | 52.35 | 0.68 |
| | 20 | 87.56 | 0.74 |
| Eastern beech | 10 | 132.5 | 1.21 |
| | 20 | 189.8 | 1.90 |
| N | 5 | 5 | 5 |

4. CONCLUSION

Table 6 shows that the first deterioration temperature is 20% Alpha-x chemically applied Scotch Pine wood (198 °C), and the highest is 0% Alpha-X chemically applied Scotch Pine (246°C). It is seen that the first amount of disintegration weight is 0% Alpha-X chemically applied Scotch Pine (88.8%), and the highest is Scotch Pine (94.3%) applied with 20% Alpha-x chemistry. Deterioration temperature was determined at the lowest 0% Alpha-x chemically applied Beech wood (483°C) and the highest at 10% and 20% Alpha-x chemically applied Scotch Pine and Eastern Beech Wood samples (600°C). It has been observed that 10% and 20% of the used fire-retardant chemicals protect wood against fire. The use of Alpha-X material for the protection of wood materials against combusting can be suggested according to these results. While the difference between the bending strength values of two tree species was statistically significant, the difference between the pressure strength values was not significant.

ACKNOWLEDGEMENT

This project was supported by Dumlupınar University Scientific Research Project unit under contract No: 2015-117. The authors are grateful to Dumlupınar University Scientific Research project unit for their financial supports.

REFERENCES

- [1] Kartal, S.N., Imamura, Y., "Use of wooden materials and composites as impregnation material of boron compounds", *II. International Boron Symposium*, 333-338, (2004).
- [2] Ors, Y., Keskin, H., "Ağaç Malzeme Teknolojisi", Gazi Üniversitesi Yayın No: 352, *Gazi Kitabevi*, Beşevler, Ankara, (2008).
- [3] Terzi, E., "Burning properties of wood material impregnated with ammonium compounds", Master's Thesis, Istanbul University Institute of Science, 106-107, (2008).
- [4] Levan, S.L., Winandy, J.E., "Effects of fire retardant treatments on wood strength", *Wood and Fire Science*, 22: 113-131, (1990).
- [5] Keskin, H., "Effects of impregnation materials on combustion properties of laminated veneer lumber obtained from European oak (*Quercus petraea* Liebl.) and Lombardy poplar (*Populus nigra* Lipsky)", *Journal of applied polymer science*, 105(4): 1766-1773 (2007).
- [6] Atar, M., Keskin, H., "Impacts of coating with various varnishes after impregnation with boron compounds on the combustion properties of Uludag fir", *Journal of applied polymer science*, 106 (6): 4018-4023, (2009).

- [7] Keskin, H., "Impacts of impregnation chemicals on the flame source combustion light intensity of the laminated veneer lumber (LVL)", *Wood Research*, 54(4): 67-78, (2009).
- [8] Hilado, C.J., Murphy, R.M., "Fire response of organic polymeric materials (Organic materials in fire: combustibility)", Design of buildings for fire safety: *A symposium ASTM Special Technical Publication*, Philadelphia, 76-105, (1979).
- [9] Lee, P., "Study On combustion properties of some wood-based materials treated with fire retarding coating by oxygen index method", *Seoul National University Journal of Agricultural Sciences*, Seoul, 205-210, (1989).
- [10] Kalın, M.B., "Improving fire retardancy specify of textile surfaces", *Master's thesis*, Kahramanmaraş S.I. University (2008).
- [11] Özdemir, F., "Investigation on the effects of various fire-retardant chemicals addition on some properties of laminated flooring", *Ph.D. Thesis*, Kahramanmaraş S.I. University, (2012).
- [12] Goldstein, I.S., "Degradation and protection of wood from thermal attack in wood deterioration and its prevention by preservative treatments", *Syracuse University*, 307-339, (1973).
- [13] TS 2476, Methods of sampling for physical and mechanical experiments in wood and general properties, *TSE*, (1976).
- [14] TS 2474, "Wood-determination of ultimate strength in static bending", Ankara, *TSE*, (1976).
- [15] TS 2595, "Wood-determination of ultimate stress in compression parallel to grain", *TSE*, Ankara, (1976).
- [16] ASTM D 1413-76, "Standard test method of testing wood preservatives by laboratory soilblock cultures", *ASTM Standards*, (1976).
- [17] Keskin, H., "Impact of impregnation chemical on the bending strength of solid and laminated wood materials", *Materials and Design*, 30(3): 796-803, 2009



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



The effect of mechanical properties and the cutting parameters on machinability of AISI 5140 steel cooled at high cooling rates after hot forging

Sıcak dövme sonrası yüksek soğuma hızlarında soğutulan AISI 5140 çeliğinin mekanik özelliklerinin ve kesme parametrelerinin işlenebilirliğe etkisi

Yazar(lar) (Author(s)): Barış ÖZLÜ¹, Halil DEMİR², Mustafa TÜRKMEN³

ORCID¹: 0000-0002-8594-1234

ORCID²: 0000-0002-9802-083X

ORCID³: 0000-0002-9402-2459

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Özlü B., Demir H. ve Türkmen M., “The effect of mechanical properties and the cutting parameters on machinability of AISI 5140 steel cooled at high cooling rates after hot forging”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 879-887, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.479345

The Effect of Mechanical Properties and the Cutting Parameters on Machinability of AISI 5140 Steel Cooled at High Cooling Rates After Hot Forging

Research Article/Araştırma Makalesi

Barış ÖZLÜ^{1*}, Halil DEMİR², Mustafa TÜRKMEN³

¹Aksaray Vocational School of Technical Sciences, Department of Mechanical Technology, Aksaray University, Turkey

²Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, Karabük University, Turkey

³Hereke Vocational School, Department of Metallurgy, Kocaeli University, Turkey

(Geliş/Received : 06.11.2018 ; Kabul/Accepted : 09.12.2018)

ABSTRACT

In this study, the effect of mechanical properties and cutting parameters (Cp) on the machinability of AISI 5140 steel cooled at high cooling rates after hot forging was investigated. The microstructural examinations and hardness measurements of the as-received AISI 5140 steel and the workpieces cooled in the oil and polymerized water after hot forging were performed. Turning process was conducted by using a coated ceramic tool at five different cutting speeds (Vc) (120, 150, 180, 210, and 240 m/min), four different feed rates (fn) (0.04, 0.08, 0.12, and 0.16 mm/rev), and four different depths of cut (ap) (0.4, 0.6, 0.8, and 1 mm) under dry machining conditions. SEM examinations of the cutting tools were also performed. It was seen from the results that the changing microstructure and hardness values had a significant effect on cutting forces (Fc) and surface roughness (Ra) from the Cp depending on cooling rate. While the highest Fc were reached in the workpiece with the highest hardness cooled in the polymerized water after hot forging, the lowest surface roughness (Ra) was obtained in the same workpiece.

Keywords: Hot forging, tempered steel AISI 5140, machinability.

Sıcak Dövme Sonrası Yüksek Soğuma Hızlarında Soğutulan AISI 5140 Çeliğinin Mekanik Özelliklerinin ve Kesme Parametrelerinin İşlenebilirliğe Etkisi

ÖZ

Bu çalışmada, sıcak dövme sonrası yüksek soğuma hızlarında soğutulan AISI 5140 çeliğinin mekanik özelliklerinin ve kesme parametrelerinin (Cp) işlenebilirliğe etkisi incelenmiştir. Alınan AISI 5140 çeliği ile sıcak dövme sonrası yağda ve polimerli suda soğutulan iş parçalarının mikroyapı incelemeleri ve sertlik ölçümleri yapıldı. Tornalama işlemi kaplamalı seramik takım kullanılarak kuru işleme şartlarında beş farklı kesme hızında (120, 150, 180, 210 ve 240 m/dak), dört farklı ilerleme miktarında (0.04, 0.08, 0.12 ve 0.16 mm/dev) ve dört farklı talaş derinliğinde (0.4, 0.6, 0.8 ve 1 mm) yapılmıştır. Ayrıca kesici takımların SEM incelemeleri yapıldı. Sonuçlarda, soğutma hızına bağlı olarak değişen mikroyapı, sertlik değerleri ve kesme parametrelerinin (Cp) kesme kuvvetleri (Fc) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Sıcak dövme işleminden sonra polimerli suda soğutularak en yüksek sertliğe sahip iş parçasında en yüksek Fc'ye ulaşılrken, aynı iş parçasında en düşük yüzey pürüzlülüğü (Ra) elde edildi.

Anahtar Kelimeler: Sıcak dövme, ıslah çeliği AISI 5140, işlenebilirlik.

1. INTRODUCTION

Medium carbon alloyed steels are widely used for the automobile parts such as crankshaft, front axle, axle sleeve, steering shaft and etc. that are produced by applying hot forging method and require high tensile and fatigue strength. Obtaining adequate hardness and strength combination in the products with the formation of martensitic structure obtained by applying high cooling rates after different heat treatment processes is generally ensured with medium carbon steels [1-2]. Fc and Ra are historically known as key performance indicators in machining operations and are mainly

affected by material properties, Cp, and selection of cutting tools [3-4]. The traditional method of machining such as rough machining, heat treatment and grinding has been replaced today by hard turning process.

A single-point machining operation of workpieces having hardness levels of 45< HRC is called as hard turning [5]. It is known that a good finishing surface will generally be obtained at low fn in the grinding process. However, when the hard turning process is compared with the grinding process, better Ra at higher machining rates is seen to be obtained in hard turning operation. Hard turning process has drawn more attraction due to its significant advantages such as shortening the finish machining time and reducing the production cost [6-7].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : barisozlu@aksaray.edu.tr

Hard turning operations require the use of cutting tools that offer high wear resistance and chemical stability at high temperature. These properties are among the properties of the cubic boron nitride (CBN) and ceramic cutting tools. Since the ceramic cutting tools are generally low cost and more economical, they have become an alternative to CBN cutting tools [8]. In order to understand the events in the hard turning process, numerous studies have been conducted on many hard materials. However, they are insufficient to generalize the knowledge and experiences obtained in the field of hard turning and to estimate the behaviors of other materials used in the manufacturing industry. Therefore, the studies conducted on machining the hard turned materials are ongoing. In this context, many studies have been conducted on the effect of the machining conditions on F_c and R_a during hard turning of hardened materials [9].

Grzesik and Wanat analyzed the part R_a of the hardened (60 HRC) AISI 5140 steel using different machining parameters under dry processing conditions with coated ceramic cutting tool. When the results were compared, it was seen that specific surface profiles were formed in the hard turning process made with coated ceramic tool but the R_a roughness value of $0.25 \mu\text{m}$ was comparable to the R_a obtained with finish grinding operation [10]. In the study by Oliveira et al., the turning tests were performed on the cylindrical workpieces and also the workpieces having channels with 4 and 8 equal segments opened across the surface of the cylindrical samples. CBN and ceramic cutting tools were used in the hard turning of the hardened workpieces (AISI 4340). They investigated the conditions that can provide the best results for the R_a and the tool wear as a result of the turning operation. The results gave the best tool life in machining the cylindrical part by using the CBN cutting tool. However, a similar tool life was obtained in the hard turning of the workpieces having 4 and 8 channels on their surfaces by using the CBN and ceramic cutting tools. In terms of the R_a , better results were obtained on the R_a of the cylindrical workpieces having 4 and 8 channels on their surfaces machined using the CBN cutting tools [11]. Aouici et al., performed the hard-turning operation on AISI H11 steel hardened up to 40, 45, and 50 HRC. The effects of V_c , f_n workpiece hardness, and a_p on R_a and F_c components during the hard turning were studied experimentally. They used CBN cutting tools in the hard turning operation. As a result of these processes, they showed that the f_n and the workpiece hardness had significant statistical effects on the R_a . They obtained the lowest R_a at high V_c and low f_n . It was also seen that the f_n and F_c affected by the a_p by 56.77% and 31.50%, respectively [12]. Mandal et al., turned AISI 4340 steel using the ceramic cutting tool at different V_c , a_p , and f_n . Based on the average response and signal to noise ratio (SNR), they determined that the optimum C_p were the V_c of 280 m/min, the a_p of 0.5 mm, and the f_n of 0.12 mm/rev. They observed that the a_p made the maximum contribution to the tool wear. They

formed the regression modeling of the tool wear and performed the reliability estimation as 95% [13]. As understood from the foregoing literature review, many studies have been conducted on the effect of the hardness of workpiece, the cutting tool material and the C_p on the F_c and R_a and these studies will continue for many years.

In this study, hot forged AISI 5140 steel used especially in automotive industry was used as the workpiece material. The aim of the present study was to investigate the effect of mechanical properties and machining parameters on the F_c and R_a as a result of the hard turning of the workpieces cooled at high cooling rates after hot forging.

2. EXPERIMENTAL STUDIES

2.1. Hot Forging, Microstructure, and Hardness (Sıcak Dövme, Mikroyapı ve Sertlik)

AISI 5140 tempered steel was selected since it has a wide area of usage in the automotive sector and the carbon rate in its chemical composition is suitable for hardening. Table 1 shows the chemical composition of the AISI 5140 tempered steel used in the experiments.

For the forging process to be performed in a closed mold, the workpieces were turned in the diameter of 46.7 mm and the length of 250 mm. The prepared workpieces were heated at 1200 °C for 30 minutes in the induction heating system in order to obtain a homogeneous structure before the forging process. The heated workpieces were subjected to the forging process in a closed mold connected to an eccentric press. The diameter of the workpieces was reduced to 35 mm after the forging process and the final temperature of the workpieces before cooling was measured as 1150 ± 20 °C. The workpieces, the temperatures of which were measured, were cooled in the oil and polymerized water. In order to obtain healthy results from the hardness, microstructural examinations and machining tests after the forging process, 1-2 mm surface layer were removed from the surfaces of the workpieces. The hardness values of the prepared workpieces were determined by using the Vickers hardness measurement method. The hardness was determined by applying a load of 1 kg (Hv1) via Buehler Micromet 5103 model device. For the microstructural examinations, the workpieces were etched with 2% nital solution and their surfaces were then cleaned with alcohol. Microstructural examinations were performed using Nikon ECLIPSE L150 optical microscope. Images in different sizes were taken from different regions of the workpieces in order for the microstructural images to represent the whole microstructure.

Table 1. The chemical composition of AISI 5140 tempered steel used in the experimental study (wt. %).

| | Elements | | | | | | | | | | | |
|-----|----------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Al | Cu | Sn | V |
| Wt% | 0.418 | 0.52 | 1.37 | 0.008 | 0.058 | 0.144 | 0.025 | 0.068 | 0.016 | 0.175 | 0.017 | 0.099 |

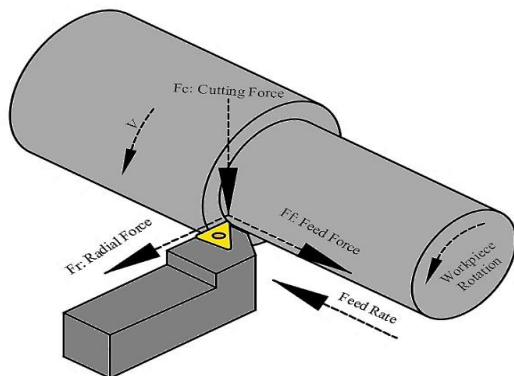
2.2. Machining Tests

The turning tests of the as-received AISI 5140 steel and the workpieces cooled in different media (oil and polymerized water) after the forging process were performed on a CNC turning centre at five different V_c , four different f_n and four different a_p under dry machining conditions. The machining parameters were chosen from the values specified in the catalogues of the cutting tool manufacturers. Table 2 shows the C_p used in the turning tests.

Table 2. The C_p used in the turning tests.

| Workpiece | C_p | | |
|-------------|----------------|----------------|------------|
| | V_c , mm/min | f_n , mm/rev | a_p , mm |
| As-Received | 120 | | |
| Oil Cooled | 150 | 0.04 | 0.4 |
| Polymerized | 180 | 0.08 | 0.6 |
| Water | 210 | 0.12 | 0.8 |
| Cooled | 240 | 0.16 | 1 |

In the turning operation, the $Al_2O_3/TiCN-TiN$ coated ceramic cutting tool by using PVD method in KY4400 quality group in the form of the WNGA 080404T01020 was selected. A DWLNR 2525 M08 KC04 tool holder appropriate to the indexable inserts used in the turning operations was used. During the turning tests, the F_c were measured using Kistler 9257 B force dynamometer which can measure three force components mounted on the turret of the CNC turning centre. Figure 1 schematically shows three force components during the cutting process. During the turning operation, they were determined by taking the averages of the force values obtained from the data transferred to Dynoware software. The roughness measurements on the surfaces obtained as a result of turning the test workpieces were performed with Mitutoyo Surftest 211 device. In the measurements, R_a values were calculated by taking the arithmetic mean of three values taken in parallel to the axis of the test workpieces.

**Figure 1.** Three force components during the turning operation.

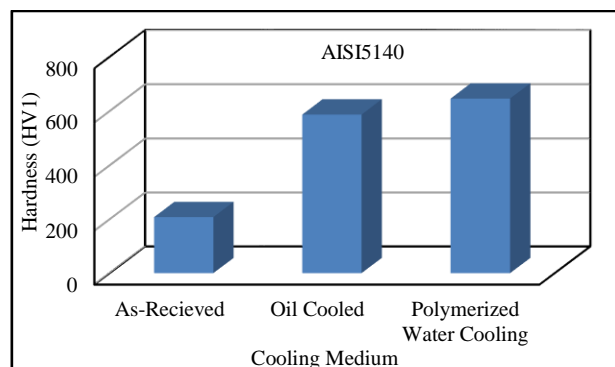
3. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. Microstructure and Hardness

Figure 2 shows the optical microscope images of the as-received AISI 5140 with the workpieces cooled in different media after hot forging.

When the image obtained from the as-received AISI 5140 steel was examined, it is seen that it is composed of ferrite and perlite phases in different sizes, Figure 2a. When examining the images obtained after the cooling of AISI 5140 steel, whose as-received microstructure was ferrite and perlite, in the oil and polymerized water after hot forging, the formation of a martensite structure was observed (Figure 2.b,c). This points out that the critical cooling rate of AISI 5140 steel lower than the cooling rate in oil and polymerized water. The alloy elements in the steel affects the critical cooling rate of the steel. Alloying elements shift the CCT and TTT diagrams to longer times, permitting to obtain all martensitic [14].

Figure 3 shows the hardness test results. The hardness value of the as-received AISI 5140 steel was measured as 208 Hv1 while the hardness values of the workpieces cooled in the oil and polymerized water were measured as 587 Hv1 and 646 Hv1, respectively. It shows that the workpiece cooled in the polymerized water had the highest hardness value. This was associated with the fact that the cooling rate in the polymerized water was higher than the cooling rate in the oil. Oil or water quenching leads to a formation of martensite phase which is very hard phase and increase the hardness [15].

**Figure 3.** Vickers hardness value (VHV) of the workpieces of AISI 5140 steel cooled in different media (as-received, in the oil, and in the polymerized water) after forging.

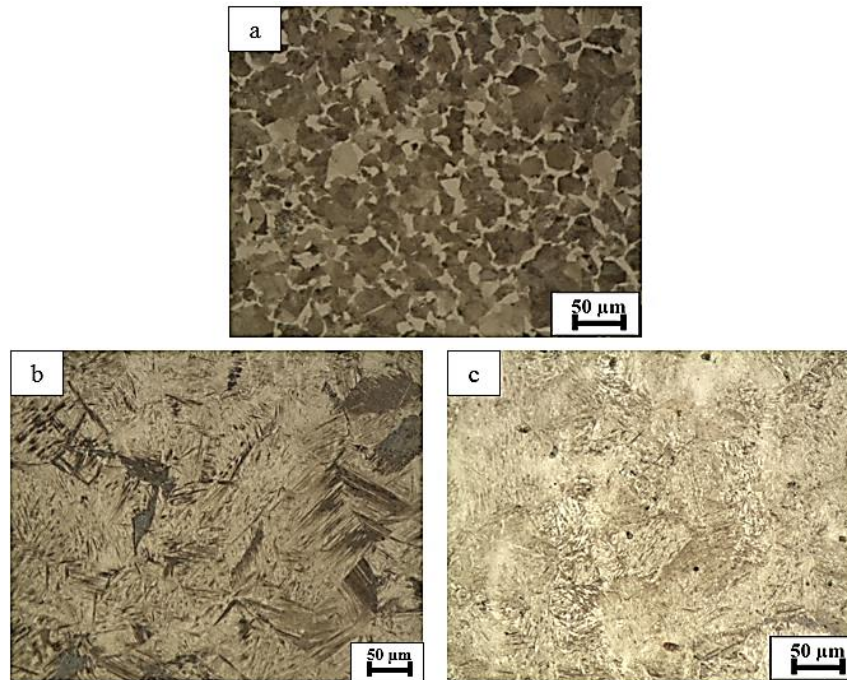


Figure 2. Optical microscope images taken from AISI 5140 steel; (a) as-received, (b) oil, (c) polymerized water.

3.2. Cutting Forces

Figures 4 a, b, and c show the change of the main F_c depending on different C_p during the turning operation of the as-received AISI 5140 steel and the workpieces, cooled in different media (in the oil and polymerized water), using the coated ceramic tool.

Figure 4.a shows the main F_c obtained during turning of all the workpieces. While the main F_c for the as received AISI 52140 steel was 136.86 N at 120 m/min V_c , it decreased at the rate of 14,38% (117.18N) when the V_c is increased up to 180 m/min. When the V_c increased from 180 m/min to 240 m/min, the main F_c showed an increase of 15.78% (135.67 N). The main F_c of the workpieces cooled in the oil and polymerized water after the forging operation were measured as 239.40 N and 254.66 N at 120 m/min V_c . A slight decrease was observed at the rates of 25,18% (179.11 N) and 23,95% (193.65 N), respectively in the F_c of the workpieces cooled in oil and polymerized water when the V_c increased from 120 m/min to 210 m/min. When the V_c increased from 210 m/min to 240 m/min, the main F_c of the workpieces cooled in the oil and polymerized water increase at the rates of 8.8% (194.88 N) and 18.44% (229.35 N), respectively. Due to the high friction coefficient between the cutting tool and the workpiece, higher F_c is obtained at low V_c . The increase temperature caus a decrease in the workpiece hardness in the region of the are removed chips as a result of the increased V_c allowed to remove chips from the material at lower F_c . As the V_c increases, the chip thickness and the F_c reduced. In addition, the decreasing of the F_c depended on the decrease in the contact area of the chip cutting tool and partially on the decrease in the shear strength in the yield region on the rake surface of the tool

partially along with the temperature increasing with the increased V_c [16]. It was an expected result that the F_c decreased with the increased V_c . However, especially the F_c of the workpieces cooled in the oil and polymerized water increased with the increase of V_c from 210 m/min to 240 m/min. Figure 5 shows this was observed to be caused by the plastic deformation, side edge, crater and notch wears occurring on the cutting tool as a result of high temperatures in the cutting region during the use of ceramic cutting tools.

Figure 4.b shows the main F_c obtained during the turning of the as-received AISI 5140 steel and the workpieces cooled in the oil and polymerized water at four f_n (0.04, 0.08, 0.12, and 0.16 mm/rev), constant V_c (180 m/min), and constant a_p (0.6 mm). The F_c of the as-received AISI 5140 and the workpieces cooled in the oil and polymerized water after hot forging at the f_n of 0.04 mm/rev were measured as 117.18 N, 181.43 N, and 198.86 N, respectively. The F_c increased gradually as the f_n increased gradually from 0.04 mm/rev to 0.16 mm/rev. The F_c of the as-received AISI 5140 steel and the workpieces cooled in the oil and polymerized water at 0.16 mm/rev f_n increased at the rate of 149.94% (292.88 N), 82.63% (331.35 N), and 76% (350 N).

Figure 4.c shows the main F_c . The F_c in the turning of the as-received AISI 5140 material and the workpieces cooled in the oil and polymerized water at a_p of 0.4 mm were measured as 106.58 N, 131.28 N, and 154.53 N. The F_c increased at the rate of 80.06% (191.91 N), 149.18% (327.12 N), and 126.51% (350.03 N) in the tests in which the a_p was increased to 1 mm.

The increase in the f_n not only creates a dynamic effect on the F_c , and also results in larger sized chips. In addition, it results in an increase in the normal contact

stress in the chip contact tool rake surface. Therefore, the F_c increase with the increase in the f_n [17,18]. Similarly, the increase in the a_p caused an increase in the F_c . The increase in the a_p increased the contact length of the cutting tool and workpiece. The increase in the chip

amount caused the deformed metal volume to grow and the need for larger F_c to remove the stone becomes important [19,20]. Thus, the lowest F_c were obtained at 0.04 mm/rev f_n and 0.04 mm a_p .

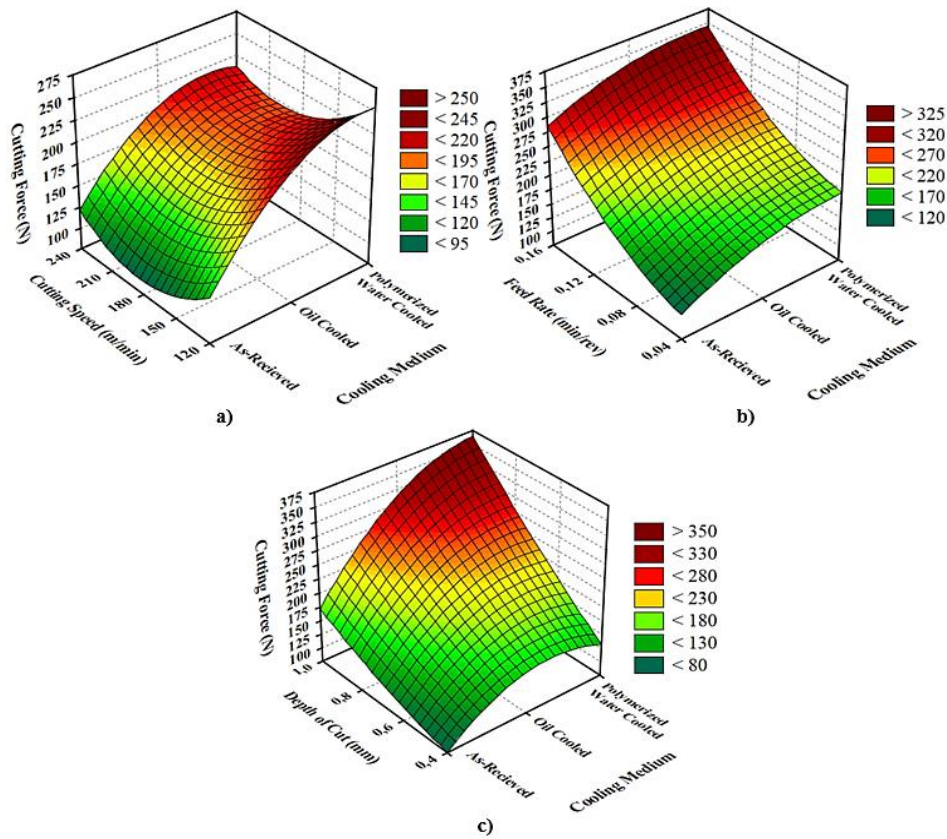


Figure 4. Changes in the main F_c of the as-received AISI 5140 steel and the workpieces cooled in oil and polymerized water after hot forging during the process with coated ceramic tool.

- a) $f=0.04$ mm/rev, $a=0.6$ mm,
- b) $V=180$ m/min, $a=0.6$ mm,
- c) $V=180$ m/min, $f=0.04$ mm/rev

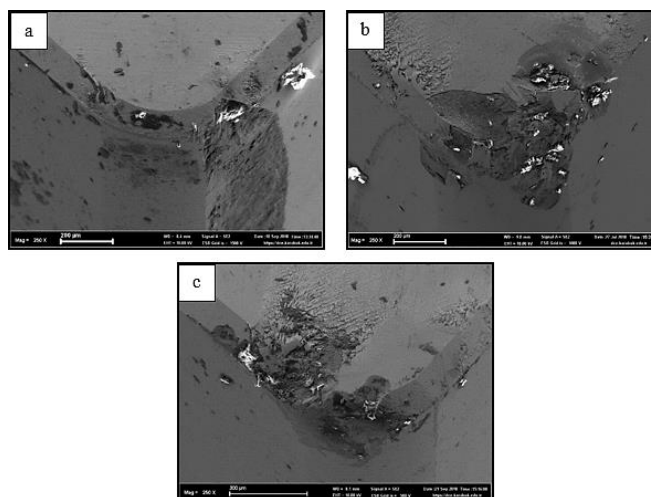


Figure 5. SEM images of the cutting tools worn at maximum F_c and R_a during the machining of the workpieces cooled in the polymerized water.

- a) Figure 4-7.a. The image of the cutting tool worn at $V_c=240$ m/min,
- b) Figure 4-7.b. The image of the cutting tool worn at $f_n=0.16$ mm/rev,
- c) Figure 4-7.c. The image of the cutting tool worn at $a_p=1$ mm.

3.3. Cutting Force and Hardness

Figure 6 shows the correlation between the averages of the F_c and the hardness of the workpieces obtained as a result of the hard turning process at different C_p of AISI 5140 as-received material and the workpieces cooled in the oil and polymerized water after hot forging.

The lowest F_c was obtained at the average F_c of 127.6 N depending on the V_c of the as-received AISI 5140 material having a hardness value of 208 Hv1 and the microstructure composed of perlite/ferrite structures. The average F_c depending on the a_p and f_n increased at the rate of 12.54% and 57.42%, respectively based on F_c . With the presence of martensite in the workpiece cooled in the oil after hot forging, its hardness increased at rate of 182.2% compared to the as-received workpiece. With the increase of the hardness, the average F_c increased at the rate of 55.62% based on V_c in the workpiece cooled in the oil compared to the as-received workpiece and its

average F_c increased at the rate of 18.2% in terms of the a_p and f_n . The cooling rate of the workpiece cooled in the polymerized water was higher than the workpiece cooled in the oil. Since the cooling rate of the workpiece cooled in the polymerized water was higher, its hardness increased at the rate of 210.58% compared to the as-received workpiece during the formation of martensite microstructure. The F_c depending on the V_c of the workpiece cooled in the polymerized water increased at the rate of 71.40% compared to the as-received workpiece and its F_c increased at the rate of approximately 15,64% in terms of the a_p and f_n . The fact that the microstructure of the workpieces cooled at high cooling rates (in the oil and polymerized water) after hot forging compared to the as-received workpiece led them to have a martensitic structure and their hardness levels to increase. For this reason, the average F_c depending on the V_c , a_p , and f_n were affected in a directly proportional way to hardness.

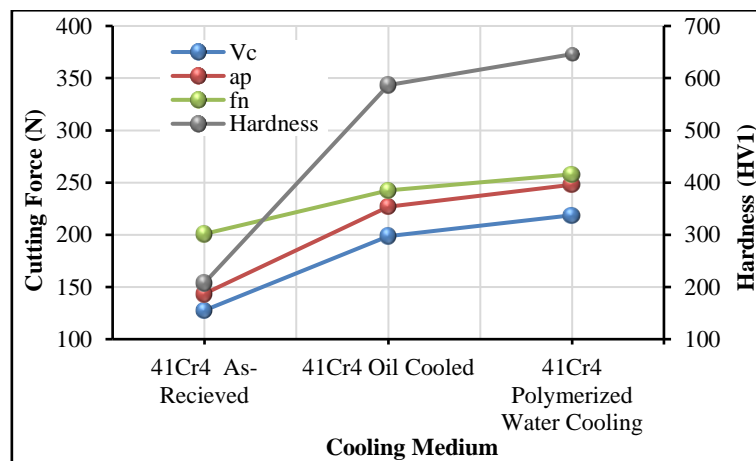


Figure 6. The correlation between the average main F_c and hardness.

3.3. Surface Roughness

Figures 7 a, b, and c show the R_a values obtained as a result of the hard turning operation of the as-received AISI 5140 material and the workpieces cooled in the oil and polymerized water after hot forging conducted using the coated ceramic tool in different C_p .

In this study, it was clearly observed that the R_a was higher at low V_c (120 m/min) and decreased when the V_c increased to 180 m/min for all machined workpieces. At 120 m/min V_c , the lowest R_a values were measured as 0.48 and 0.56 μm for the workpieces cooled in the oil and polymerized water; whereas, the highest roughness value was obtained as 0.78 μm for the as-received AISI 5140 (Figure 7.a). The R_a values of the as-received AISI 5140 material and the workpieces cooled in the oil and polymerized water at 180 m/min V_c were 0.53 μm , 0.39 μm , and 0.32 μm , respectively. The decreasing R_a values of the turned workpieces were lower at the rate of approximately 40% at 180 m/min V_c compared to the values measured at 120 m/min V_c . The decreasing R_a as a result of the increasing V_c from 120 m/min to 180 m/min can be explained with less built-up edge (BUE)

formation due to thermal softening at high temperature caused by the increasing V_c [21,22]. When the V_c reached to 210-240 m/min, an increasing tendency is seen in the R_a values. When the V_c increased from 180 m/min to 240 m/min, the R_a values of the as-received AISI 5140 steel and the workpieces machined after cooling in the oil and polymerized water after hot forging increased at the rates of 3.58%, 48.18%, and 87.64%. Figure 5 shows The fact that the R_a values increased again when the V_c reached to maximum values (210-240 m/min) can be explained by the decreased wear resistance of the cutting tool due to the rapid temperature increase in the cutting edge and thus it increase the wear.

Figure 7.b shows R_a values of the workpieces machined at four f_n (0.04, 0.08, 0.12, and 0.16 mm/rev), constant V_c (180 m/min), and constant a_p (0.6 mm). The R_a value was measured as 0.53 μm in as-received AISI 5140 material in the turning tests performed at 0.04 mm/rev f_n . The roughness values of the machined surfaces of the workpieces cooled in the oil and polymerized water under the same machining conditions decreased at the rates of 33.58% (0.39 μm) and 62% (0.33 μm). The R_a

values of the as-received AISI 5140 steel and the workpieces cooled in the oil and polymerized water increased at the rates of 256.4%, 478.68%, and 657.8% by increasing the f_n up to 0.16 mm/rev.

Figure 7.c shows the R_a values of the surfaces machined at constant V_c (180 m/min), constant f_n (0.04 mm/rev) and four a_p (0.4, 0.6, 0.8, and 1 mm). The roughness values of the surfaces of the as-received AISI 5140 and the workpieces cooled in oil and polymerized water machined at the a_p of 0.4 mm were measured as 0.65 μm , 0.51 μm , and 0.43 μm . As the a_p increased up to 0.6 mm, the average R_a values decreased at the rates of 22-29% in average. The R_a values of the as-received AISI 5140 and the workpieces cooled in the oil and polymerized water increased at the rates of 35.44%, 161.16%, and 257.70%. According to the test results, R_a value is increased with increasing in the f_n . This situation is in parallel with the literature studies [23]. The R_a values of the as-received AISI 5140 steel at 120-210 m/min V_c , 0.04-0.14 mm/rev f_n and 0.4-0.7 mm a_p were found to be higher than the R_a values of the workpieces cooled in the oil and polymerized water after forging process. This is

because the as-received AISI 5140 steel having ferrite and perlite microstructure was more ductile than the workpieces having martensitic microstructure cooled in the oil and polymerized water after hot forging. Furthermore, the increase in the hardness in the ranges of the C_p stated above affected positively the roughness values of the machined surfaces. In addition, when the microstructural images (Figure 2.a,b,c) are examined, the large ferrite/perlite grain sizes of the as-received AISI 5140 steel caused the formation of craters which are larger than the machined surfaces of the workpieces having martensitic microstructure cooled in the oil and polymerized water [22, 24, 26]. In the tests performed at the values higher than 210 m/min V_c , approximately 0.14 mm/rev f_n and 0.7 mm a_p , the roughness values of the machined surfaces showed an opposite situation. The reason for this is evaluated as the negative effects of the abrasion, forming in the cutting tool due to the high resistance forming by the workpieces with increasing hardness increased against cutting, on the R_a . In addition, the R_a values increased along with the increasing F_c [25].

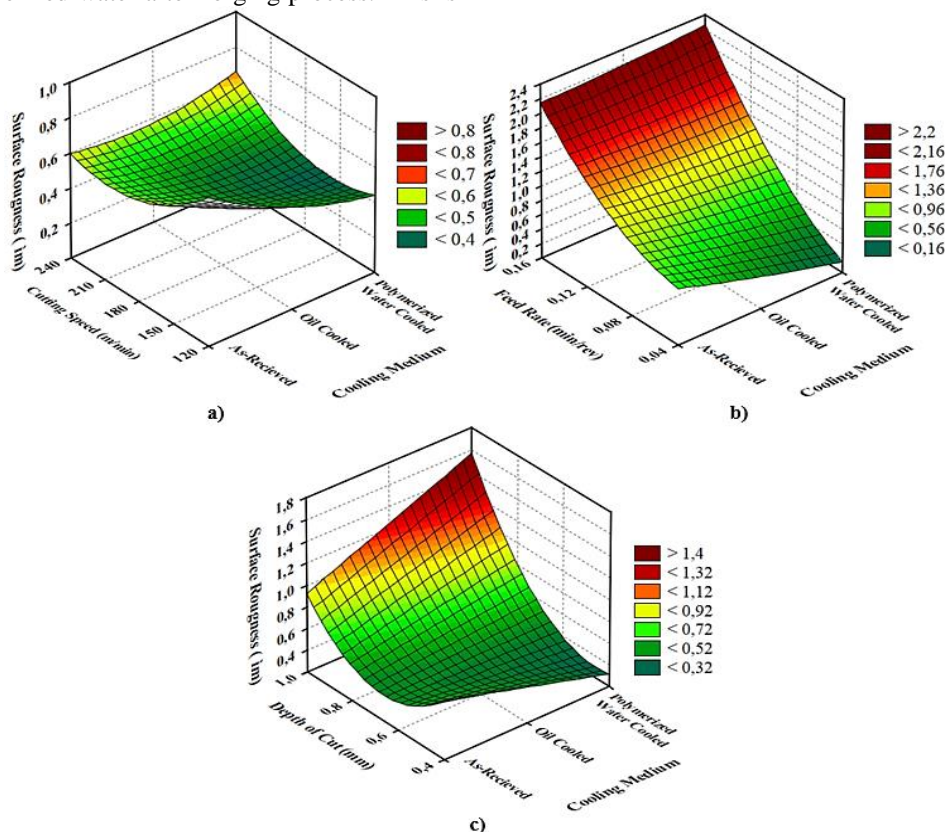


Figure 7. R_a values of the as-received AISI 5140 steel and the workpieces cooled in the oil and polymerized water after hot forging by using the coated ceramic tool.

- a) $f=0.04$ mm/rev, $a=0.6$ mm,
- b) $V=180$ m/min, $a=0.6$ mm,
- c) $V=180$ m/min, $f=0.04$ mm/rev.

4. CONCLUSIONS

In this study, the impress of the microstructure, hardness, and different Cp on Fc and Ra when turning as-received AISI 5140 steel and the workpieces cooled in different media (oil and polymerized water) after hot forging was investigated. In the tests conducted with turning method, the coated ceramic cutting tools were used. The results obtained in this study are summarized below:

- 1) It was observed that the microstructure of the as-received AISI 5140 steel had ferrite/perlite structures and its hardness was measured as 208 Hv1. Cooling in the oil and polymerized water having high cooling rates after hot forging operation caused the workpieces to have a martensitic microstructure. However, the fact that the cooling rate in the polymerized water was higher than the cooling rate in the oil led them to have the highest hardness (646 Hv1) value.
- 2) In all the turning tests, the increases in the hardness and the increase in the Fc were parallel in the workpieces with increasing hardness. In addition, while the most effective Cp in the increase of Fc was determined as fn, it was followed by the ap and Vc.
- 3) While the lowest Ra until the wear of the cutting tools in the turning tests was obtained in the workpieces cooled in the oil and polymerized water in direct proportion to the hardness, the Ra of these two workpieces increased after the Cp when the wear of the cutting tool started.
- 4) It was observed during the turning operation of the workpieces with increasing hardness that the wear started in the cutting tool and the cutting tool lost its cutting capability as the Vc, fn and ap increased.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Karabük University Scientific Research Projects Coordination Unit (Project Number: KBÜ-BAP-16/1-DR-169).

REFERENCES

- [1] Hu C.L., Zhao Z., Gong A.J., Shi W.B., "Effect of Warm Deformation Parameters and Cooling Rates on the Recrystallization Transformation Microstructure in 40Cr Steel", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24: 505-516, (2015).
- [2] Ceschini L., Marconi A., Martini C., Morr A., Schino A., "Tensile and Impact Behaviour of A Microalloyed Medium Carbon Steel: Effect of The Cooling Condition and Corresponding Microstructure", *Materials & Design*, 45: 171-178, (2013).
- [3] Ulas H.B., Bilgin M., Sezer M.B., Özkan M.T., "Performance of Coated and Uncoated Carbide/Cermet Cutting Tools During Turning", *Materials Testing* 60: 893-901, (2018).
- [4] Özkan M.T., "Surface roughness during the turning process of a 50CrV4 SAE 6150 steel and ANN based modeling", *Materials Testing* 57: 889-896, (2015).
- [5] Shalaby M.A., El Hakim M.A., Abdelhameed M.M., Krzanowski J.E., Veldhuis S.C. Dosbaevad G.K., "Wear Mechanisms of Several Cutting Tool Materials in Hard Turning of High Carbon-Chromium Tool Steel", *Tribology International*, 70: 148-154, (2014).
- [6] Tang L., Cheng Z., Huang J., Gao C., Chang W., "Empirical Models For Cutting Forces in Finish Dry Hard Turning of Hardened Tool Steel at Different Hardness Levels", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76:691-703, (2015).
- [7] Bartarya G., Choudhury S.K., "State of The Art in Hard Turning", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 53: 1-14, (2012).
- [8] Meddour L., Yallese M.A., Khattabi R., Elbah M., Boulanouar L., "Investigation and Modeling of Cutting Forces and Surface Roughness When Hard Turning of AISI 52100 Steel With Mixed Ceramic Tool: Cutting Conditions Optimization", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77: 1387-1399, (2015).
- [9] Bouacha K., Yallese M.A., Mabrouki T., Rigal J.F., "Statistical Analysis of Surface Roughness and Cutting Forces Using Response Surface Methodology in Hard Turning of AISI 52100 Bearing Steel With CBN Tool", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 28: 349-361, (2010).
- [10] Grzesik W., Wanat T., "Comparative Assessment of Surface Roughness Produced by Hard Machining With Mixed Ceramic Tools Including 2D and 3D Analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, 169: 364-371, (2005).
- [11] Oliveira A.J., Diniz A.E., Ursolino D.J., "Hard Turning in Continuous and Interrupted Cut With PCBN and Whisker-Reinforced Cutting Tools", *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 5262-5270, (2009).
- [12] Aouici H., Yallese M.A., Chaoui K., Mabrouki T., Rigal J.F., "Analysis of Surface Roughness and Cutting Force Components in Hard Turning With CBN Tool: Prediction Model and Cutting Conditions Optimization", *Measurement*, 45: 344-353, (2012).
- [13] Mandal N., Doloi B., Mondal B., Das R., "Optimization of Flank Wear Using Zirconia Toughened Alumina (ZTA) Cutting Tool: Taguchi Method And Regression Analysis", *Measurement*, 44: 2149-2155, (2011).
- [14] Özlü B., Demir H., Türkmen M., Gündüz S., "Microstructure and Hardness Properties of Hot Forged 30MnVS5 Steel Cooled in Different Mediums", *2nd International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences* Cluj Napoca Technical University, Romania, 9-12, (2017).
- [15] Kaynar A., Gündüz S., Türkmen S., "Investigation on the behaviour of medium carbon and vanadium microalloyed steels by hot forging test", *Materials and Design*, 51: 819:825, (2013).
- [16] Selvaraj D.P., Chandramohan P., Mohanraj M., "Optimization of Surface Roughness, Cutting Force and Tool Wear of Nitrogen Alloyed Duplex Stainless Steel in A Dry Turning Process Using Taguchi Method", *Measurement*, 49: 205-215, (2014).
- [17] Thakur D.G., Ramamoorthy B., Vijayaraghavan L., "Study on The Machinability Characteristics of Superalloy Inconel 718 During High Speed Turning", *Materials & Design*, 30: 1718-1725, (2009).
- [18] Yallese A.M., Chaoui K., Zeghibb N., Boulanouar L., Rigal J.F., "Hard Machining of Hardened Bearing Steel

- Using Cubic Boron Nitride Tool”, *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 1092-1104, (2009).
- [19] Lima J.G., Avila R.F., Abrao A.M., Faustino M., Davimb J. P., “Hard Turning: AISI 4340 High Strength Low Alloy Steel and AISI D2 Cold Work Tool Steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 169: 388-395, (2005).
- [20] Bouchelaghem H., Yaltese M.A., Mabrouki T., Amirat A., Rigal J.F., “Experimental Investigation and Performance Analyses of CBN Insert in Hard Turning of Cold Work Tool Steel (D3)”, *Machining Science and Technology*, 14: 471-501, (2010).
- [21] Ferreira R., Carou D., Lauro C.H., Davim J.P., “Surface Roughness Investigation in the Hard Turning of Steel Using Ceramic Tools”, *Materials and Manufacturing Processes*, 31: 648-652, (2016).
- [22] Palanisamy D., Senthil P.b, “A Comparative Study on Machinability of Cryo-Treated and Peak Aged 15Cr5Ni Precipitation Hardened Stainless Steel”, *Measurement*, 116: 162-169, (2018).
- [23] Özkan M.T., Ulaş H.B., Bilgin M., “Experimental Design And Artificial Neural Network Model For Turning The 50CrV4 (SAE 6150) Alloy Using Coated Carbide/Cermet Cutting Tools”, *Mater. Tehnol.*, 48: 227-236, (2014).
- [24] Liu K., Shan Y., Yang Z., Liangj., Lu L., Yang K., “Effect of Heat Treatment on Prior Grain Size and Mechanical Property of a Maraging Stainless Steel”, *Journal of Materials Science & Technology*, 22:769-774, (2006).
- [25] Ulaş H.B., “Experimental Determination of Cutting Forces and Surface Roughness when Turning 50CrV4 Steel (SAE 6150) and Modelling with the Artificial Neural Network Approach”, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 67: 867-879, (2014).
- [26] Kumar KV., Choudhury S.K., “Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments”, *Journal of Materials Processing Technology*, 203: 95-101 (2008).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Odunun yüzey pürüzlülüğünün ve adezyon direncinin yapay sinir ağları ile tahmini

Prediction of surface roughness and adhesion strength of wood by artificial neural networks

Yazar(lar) (Author(s)): Şükrü ÖZŞAHİN¹, Hilal SINGER²

ORCID¹: 0000-0001-8216-0048

ORCID²: 0000-0003-0884-2555

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Özşahin Ş. ve Singer H., “Odunun yüzey pürüzlülüğünün ve adezyon direncinin yapay sinir ağları ile tahmini”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 889-900, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.481762

Odunun Yüzey Pürüzlülüğünün ve Adezyon Direncinin Yapay Sinir Ağları ile Tahmini

Araştırma Makalesi / Research Article

Şükrü ÖZŞAHİN*, Hilal SİNGER

Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 12.11.2018 ; Kabul/Accepted : 18.12.2018)

ÖZ

Mobilya ve dekorasyon elemanlarının üretiminde kullanılan ağaç malzemelerin yüzey pürüzlülüğünün ve adezyon direncinin belirlenmesi, nihai ürünün kalitesinin değerlendirilmesi bakımından çok önemlidir. Bu makalede ilk olarak, odun türü, kesme yönü ve zımpara kağıdı türünün yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini incelemek için yapay sinir ağı (YSA) ile yüzey pürüzlülüğü tahmin modeli geliştirilmiştir. Daha sonra, vernik türü, odun türü, kesme yönü ve yüzey pürüzlülüğünün adezyon direnci üzerine etkileri YSA ile geliştirilen adezyon direnci tahmin modeliyle araştırılmıştır. En iyi performansa sahip tahmin modelleri istatistiksel ve grafiksel karşılaştırmalar yoluyla belirlenmiştir. YSA modellerinin kabul edilebilir sapmalarla oldukça tatmin edici neticeler elde ettiği görülmüştür. Sonuç olarak bu çalışmanın bulguları, deneysel araştırmalar için zaman, enerji ve maliyeti azaltmak amacıyla mobilya ve dekorasyon endüstrisinde etkili bir şekilde uygulanabilir.

Anahtar Kelimeler: Yapay sinir ağları, odun, yüzey pürüzlülüğü, adezyon direnci, tahmin.

Prediction of Surface Roughness and Adhesion Strength of Wood by Artificial Neural Networks

ABSTRACT

Determining the surface roughness and adhesion strength of wood materials used in the manufacturing of furniture and decoration elements is very crucial in terms of evaluating the quality of the final product. In this article, firstly, the surface roughness prediction model was developed with the artificial neural network (ANN) to examine the effects of wood species, cutting direction and sandpaper type on surface roughness. Then, the effects of varnish type, wood species, cutting direction and surface roughness on adhesion strength were investigated with the adhesion strength prediction model developed with ANN. The prediction models with the best performance were determined by statistical and graphical comparisons. It has been observed that ANN models yielded very satisfactory results with acceptable deviations. As a result, the findings of this study could be employed effectively into the furniture and decoration industry to reduce time, energy and cost for empirical investigations.

Keywords: Artificial neural networks, wood, surface roughness, adhesion strength, prediction.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ahşap, hem yapısal hem de yapısal olmayan uygulamalarda kullanılabilen sürdürülebilir ve çevre dostu doğal bir malzemedir [1]. En eski yapı malzemelerinden biri olan ahşap, beton ve çelik ile karşılaştırıldığında hafif olması, kolay bulunabilmesi, estetik görünümü ve bazı üstün mekanik özellikleri nedeniyle birçok uygulama alanında tercih edilmektedir [2, 3]. Ağaç malzemeler, kullanım yerlerinde maruz kaldıkları dış etkenlere karşı uzun süre direnç gösteremediklerinden dolayı bu malzemelerle üretilen mobilya ve dekorasyon elemanlarının korunması gerekir. Bu amaca hizmet eden en önemli maddelerden biri verniktir. Ağaç malzemelerin yüzeylerini dış etkenlere karşı korumak için farklı vernik katmanları ile kaplamak en yaygın kullanılan yöntemdir [4]. Adezyon direnci, katman performansını değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Vernik türü, verniklerin odun

yüzeyine tutunma direncinde görülen farklılığın en önemli sebeplerinden birisidir. Bir verniğin yüzeye yapışma mukavemeti verniğin kullanılabilirliğini gösterir. Adezyon direncinin belirlenmesi için çapraz kesim testi (cross-cut test), bant soyma testi (tape-peel test) ve çekme testi (pull-off test) yöntemlerinden faydalanılabilir [5].

Adezyon direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu için yüzey pürüzlülüğünün tespit edilmesi gerekir [6]. Pürüzlülük, üretim sürecinin veya malzeme özelliklerinin etkisiyle işlenmiş bir yüzeyde meydana gelen küçük düzensizlikleri karakterize eder [7]. Orman ürünleri, odunun testere, planya, zımpara vb. işleme tabi tutulmasından sonra oluşmaktadır [8]. İşleme sonucunda elde edilen yüzeyin kalitesi, odun türü, rutubet miktarı gibi odun özelliklerinden ve kesici sayısı, kesme açısı, kesici körlüğü, besleme hızı, kesme hızı gibi işleme koşullarından önemli ölçüde etkilenir [9]. Odunun yüzey pürüzlülüğü, nihai ürünün kalitesini belirlemede en önemli kriterlerden biridir. Bu nedenle, nihai ürünün yüzey kalitesini iyileştirmek için işleme koşulları ve

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : sukru@ktu.edu.tr

odun özellikleri ile ilgili parametrelerin dikkate alınması önemlidir [10]. Yüzey pürüzlülüğünün hem niteliksel hem de niceliksel olarak değerlendirilmesi mümkündür. Geleneksel görsel ve dokunma yöntemleri ile yüzeyin niteliksel bir değerlendirmesi yapılabilir, ancak bu yolla yüzeyin özel bilgileri ölçülememektedir. Yüzey pürüzlülüğünü nicelleştirmek için dokunmalı iğne tarama, optik, ultrasonik, video kamera gibi yöntemler kullanılır [11].

Yüzey pürüzlülüğü ve adezyon direnci özelliklerini etkileyen çok sayıda faktör vardır ve bu faktörler birbirleriyle etkileşim içerisindedir. Bu nedenle, en iyi sonuçlara ulaşmak için faktörlerin etkilerinin saptanıp optimum koşulların belirlenmesi gerekir. Ancak, faktörlerin adezyon direnci ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmak için kapsamlı deneylerin yapılmasına gerek vardır. Bu tarz deneyler, yüksek maliyetler ile zaman ve enerji kaybına neden olabilmektedir. Yapay sinir ağı (YSA) yaklaşımı bu tür sorunlarla başa çıkabilmek için alternatif bir araç olarak kullanılabilir. Son zamanlarda, YSA'nın bir sürecin veya sistemin değişkenleri arasındaki karmaşık, tanımlanmamış ve doğrusal olmayan ilişkileri herhangi bir ön bilgi gerekmeden öğrenebilme yeteneği pek çok araştırmacının dikkatini çekmiş ve YSA yaklaşımı farklı mühendislik alanlarındaki problemleri çözmede önemli bir rol oynamıştır [12, 13].

Literatürdeki birçok çalışmada ahşap biliminin çeşitli alanlarındaki problemleri çözmek için YSA modellerinin geliştirilmesine odaklanılmıştır. Bu çalışmalara ısı işlemli odunun denge rutubet miktarının ve özgül ağırlığının tahmini [13], odunun ısı iletkenliğinin hesaplanması [14], kırılma dayanımının tahmini [15], ahşap kaplama kusurlarının sınıflandırılması [16], kurutma karakteristiklerinin belirlenmesi [17] ve yönlendirilmiş yonga levha üretiminde proses parametrelerinin optimizasyonu [18, 19] örnek olarak verilebilir. Ahşap biliminin çeşitli alanlarında YSA yaklaşımının birçok uygulaması bulunmasına rağmen, odunun yüzey pürüzlülüğü ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır. Tiryaki ve ark. [20] planyalanmış odunların yüzey pürüzlülüğü değerlerini tahmin etmek için YSA yaklaşımını kullanmışlardır. Çalışmalarında, odun türü, besleme oranı, bıçak sayısı, kesme derinliği, ilkbahar-yaz odunu ve zımpara numarası girdi değişkenlerine dayalı olarak yüzey pürüzlülüğü çıktı değişkeni tahmin edilmiştir. Tiryaki ve ark. [21] tarafından yapılan bir diğer çalışmada, odun türü, basınç miktarı, işleme hızı, aşındırıcı tipi ve aşındırıcı tane sayısı değişkenlerinin zımparalama işleminde yüzey pürüzlülüğü ve güç tüketim düzeyleri üzerine etkileri literatürden elde edilen veriler kullanılarak YSA yaklaşımı ile modellenmiştir. Odunun yüzey pürüzlülüğünün tahmini için bazı YSA modelleri geliştirilmiş olsa da, daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu açıktır. Öte yandan, ilgili literatürde yapışma mukavemetinin YSA ile tahmini için yapılan çalışmalarda birbirine tutkal vasıtasıyla yapıştırılan ahşap veya ahşap esaslı malzemelerin yapışma direnci deneylerinden elde edilen sonuçların modellenmesi

gerçekleştirilmiştir [22, 23]. Yürütülen çalışmalar ağaç malzemede vernik katmanı tutunma direncinin YSA ile modellenmesinden farklıdır.

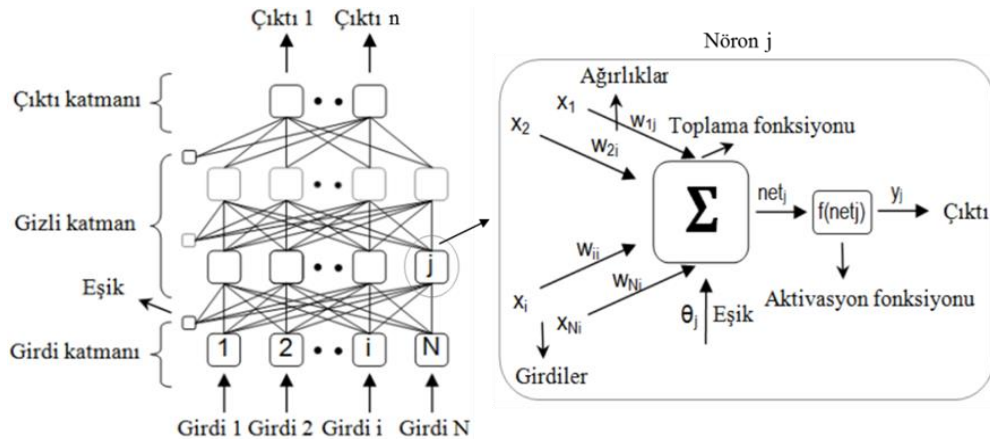
Literatür araştırması, ahşap biliminde sınıflandırma, tahmin ve optimizasyon amaçları için YSA yaklaşımının yaygın olarak kullanıldığını göstermiştir. Ahşap biliminde YSA'nın birçok uygulaması bulunmasına rağmen, yüzey pürüzlülüğünün YSA yaklaşımı ile tahminine ilişkin çalışmaların sayısı azdır. Ayrıca, ilgili literatürde ağaç malzemede vernik katmanı tutunma direncinin YSA ile modellenmesine yönelik herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu yüzden bu çalışmada, odunun yüzey pürüzlülüğü ve vernik adezyon direnci değerlerini yüksek bir doğrulukta tahmin etme yeteneğine sahip YSA modellerinin geliştirilmesine odaklanılmıştır. Bu açıdan bu çalışma, odun türü, kesme yönü ve zımpara kağıdı türü değişkenlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri ile vernik türü, odun türü, kesme yönü ve yüzey pürüzlülüğü değişkenlerinin adezyon direnci üzerine etkilerini aynı çatı altında YSA yaklaşımı ile modelleyen ilk girişim olacaktır. Geliştirilen YSA modellerinin tahmin sonuçları, deneysel araştırmalar için zaman, enerji ve maliyeti azaltmak amacıyla mobilya ve dekorasyon endüstrisinde etkili bir şekilde uygulanabilecektir.

2. YAPAY SİNİR AĞLARI (ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS)

YSA, biyolojik sinir ağlarının yapısal ve/veya işlevsel yönlerinden ilham alınarak oluşturulmuş matematiksel veya hesaplamalı bir modeldir [24]. Güçlü bir modelleme aracı olan YSA, herhangi bir varsayıma gerek duymadan parametreler arasındaki karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri tanımlayabilme yeteneğine sahip olduğu için geleneksel istatistiksel yöntemlere göre birçok avantaj sunar [19, 25]. YSA'nın doğrusal olmayan fonksiyon tahmini, sınıflandırma, örüntü tanıma, optimizasyon, kümeleme ve simülasyon gibi çeşitli uygulamalarda kullanılması mümkündür [26].

YSA'nın çeşitlerinden biri olan çok katmanlı algılayıcı (ÇKA), tahmin amaçlı kullanılan en popüler ağıdır. ÇKA, problemin girdi değişkenlerini temsil eden nöronları içeren bir girdi katmanından, çıktı değişken(ler)ini temsil eden nöron(lar)a sahip bir çıktı katmanından ve sistemdeki doğrusal olmayanlığı yakalamaya yardımcı olmak için nöron(lar) içeren bir veya daha fazla gizli katmandan oluşur [27]. YSA'nın birinci katmanı gelen bilgiyi alan girdi katmanıdır. Girdi katmanı bu bilgiyi ara (gizli) katmana iletir. Gizli katman bu bilgiyi işler ve ardından işlenmiş bilgiyi çıktı katmanına gönderir. Çıktı katmanı bilgiyi alır ve son olarak çıktı verilerini üretir [28].

İşlemci elemanlar (nöronlar), YSA katmanlarındaki temel öğedir. ÇKA'da aynı katmanın nöronları arasında herhangi bir bağlantı yoktur. Girdi ve çıktı nöronlarının sayısı sırasıyla bağımsız (girdi) ve bağımlı (çıktı) değişkenlerin sayısına eşittir [29]. Ancak, gizli katmanın ve nöronlarının sayıları ile ilgili özel bir kural yoktur.



Şekil 1. YSA'nın şematik bir gösterimi (A schematic illustration of the ANN)

Çok az sayıdaki gizli nöron öğrenme sürecini olumsuz yönde etkileyebilir. Öte yandan, çok sayıdaki gizli nöron aşırı uyum sorununa yol açacağından ağır genelleme yeteneğini önlüyor [30]. Optimum gizli katman sayısının ve gizli nöron sayısının belirlenmesinde çoğunlukla deneme yanılma yöntemi kullanılır [31].

Ağdaki herhangi bir nöron önceki katmanın nöronlarından bağlantı ağırlıkları (w_{ij}) ile ağırlıklandırılmış giriş sinyallerini (x_i) alır. Bir nöronun net girdisi (net_j), ağırlıklı sinyallerin ve ilgili eşik (θ_j) toplamı ile elde edilir. Çıktı değerleri (y_j), net_j 'e matematiksel fonksiyon ($f(.)$) uygulanarak hesaplanır ve sonraki katmanın nöronlarına gönderilir. Bu süreç, Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 ile formüle edilir. YSA'nın şematik bir çizimi Şekil 1'de verilmiştir [19].

$$net_j = \sum_{i=1}^n x_i w_{ij} - \theta_j \quad (1)$$

$$y_j = f(net_j) \quad (2)$$

Eğitim ve test YSA'nın iki ana aşamasıdır. Eğitim aşamasında, gerçek sonuçlar ile model çıktılarının birbirine olabildiğince yaklaşması için ağırlık ve eşik değerleri sürekli olarak değiştirilir [32]. Bu süreç, hata oranı en aza indirilinceye veya kabul edilebilir bir seviyeye ulaşıncaya dek tekrarlanır. Test aşamasında, modelin performansı eğitimin herhangi bir aşamasında kullanılmamış bir veri seti ile kontrol edilir. Ağ performansının yüksek olması durumunda ilgili ağırlık ve eşik değerleri hafızaya alınır. İyi eğilmiş/öğrenmiş bir YSA, daha önceden ağa sunulmayan verilerin sonucunu tahmin etmek için kullanılabilir [33].

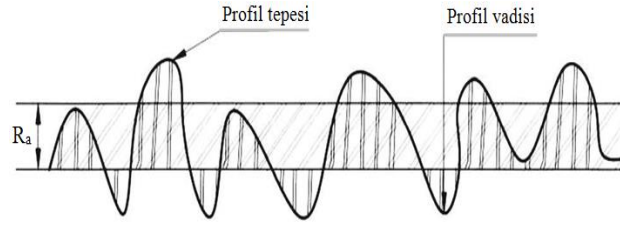
3. YAPAY SİNİR AĞI MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ (DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODELS)

3.1. Veri Toplama (Data Collection)

Bu çalışmada kullanılan veriler Söğütü ve ark. [34] tarafından yapılan bir çalışmadan elde edilmiştir. Yazarlar, Türkiye'nin Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yetişen sarıçam (*Pinus sylvestris* L.), kayın (*Fagus*

orientalis L.) ve kiraz (*Prunus cerasus*) odunlarını deney materyalleri olarak seçmişlerdir [35]. Sarıçam, kayın ve kiraz odunlarının ortalama hava kurusu yoğunluk değerleri sırasıyla 0,51 g/cm³, 0,63 g/cm³ ve 0,58 g/cm³'tür. Numunelerin verniklenmesinde akrilik (AC) vernik, poliüretan (PU) vernik ve su bazlı (WB) vernik tercih edilmiştir. Hava kurusu rutubetteki numuneler, 100 x 100 x 10 mm³ ölçülerinde radyal veya teğet yönde kesilmiştir. Odun türü, kesme yönü, vernik türü ve zımpara kağıdı türü (80, 120, 180) faktörleri için 10'ar adet olmak üzere 3 x 2 x 3 x 3 deneme desenine göre 540 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, güneş ışığına doğrudan maruz kalmayan iyi havalandırılmış bir ortamda 20 ± 2 °C sıcaklık ve %50 ± 5 bağıl nem şartlarında sabit bir ağırlığa ulaşıncaya kadar bekletilmiştir. Ön kontroldeki 20 adet örneğin ortalama rutubet miktarı %9 ± 0,5 olarak belirlenmiştir [36]. Deney numuneleri ASTM-D 1667-87 [37] esaslarına uyularak hazırlanmıştır. Radyal ve teğet yüzeylerin zımparalama işlemleri bant zımpara makinesinde 9 m/dk besleme hızında gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ISO 4287 [38] ve TS 2495 EN ISO 3274 [39] standartlarına göre TIME TR-200 test cihazı ile belirlenmiştir. Numunelerin pürüzlülük sonuçlarının değerlendirilmesinde ortalama pürüzlülük (R_a) parametresi kullanılmıştır (bkz. Şekil 2). Yüzey pürüzlülüğü deneylerinin ardından adezyon direnci deneyleri için hazırlık yapılmıştır. Örneklerin verniklenmesi ASTM-D 3023 [40] esaslarına uygun olarak yapılmıştır. İki kat vernik uygulaması gerçekleştirilmiş ve her bir kat için yaklaşık olarak 90 g/m² vernik kullanılmıştır. Son kat akrilik ve poliüretan verniklerin uygulanmasında püskürtme tabancası kullanılırken, su bazlı verniğin uygulanması için orta kıl sertliğinde fırça kullanılmıştır. Püskürtme tabancası yüzeyden 20 cm uzaklıkta sabit bir hızda hareket ettirilmiştir. Kurutulan numunelerde katlar 400 numaralı zımpara kağıdı ile hafifçe zımparalanmıştır. Deney silindirleri örneklerin ortasına epoksi tutkalı ile yapıştırılmış ve basınç altında 24 saat süreyle bekletilmiştir. Deneylerde 688 kgf kapasitesine sahip TÜBİTAK TOGTAG-1100012 pnömatik adezyon test

cihazı kullanılmıştır. Çekme testi gerçekleştirerek adezyon direnci değerlendirilmiştir [41].



Şekil 2. İğne uçlu tarama cihazı ile belirlenen yüzey profili (Surface profile determined with a stylus-type profilometer) [34]

3.2. Yapay Sinir Ağı Analizi (Artificial Neural Network Analysis)

Bu çalışmada, odunun yüzey pürüzlülüğü ve adezyon direnci değerleri literatürden elde edilen verileri kullanarak YSA yaklaşımı ile modellenmiştir. YSA'ların oluşturulması, eğitimi ve optimizasyonu MATLAB paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, odun türü, kesme yönü ve zımpara kağıdı türü değerlerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü düzeyindeki değişim modellenmiştir. Ardından, vernik türü, odun türü, kesme yönü ve yüzey pürüzlülüğü değerlerine dayanarak adezyon direnci düzeyindeki değişimin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. İlgili değişkenlerin yüzey pürüzlülüğü ve adezyon direnci düzeyleri üzerine etkilerini incelemek amacıyla; deney verileri eğitim ve test verileri şeklinde rastgele ve homojen bir şekilde gruplandırılıp, farklı veri setleri oluşturularak YSA'ları eğitmek için kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün modellenmesi için deney verileri (18 veri) arasından 12

veri (toplam verinin %66,67'si) eğitim seti için ayrılmış ve geri kalan 6 veri (toplam verinin %33,33'ü) test seti için tahsis edilmiştir. Adezyon direncinin modellenmesi için deney verileri (54 veri) arasından 36 veri (toplam verinin %66,67'si) YSA'ların eğitimi için tercih edilmiş ve geri kalan 18 veri (toplam verinin %33,33'ü) YSA'ların performansını test etmek amacıyla kullanılmıştır. Tahmin modellerinde kullanılan veri setlerini yüzey pürüzlülüğü için Çizelge 1 ve Çizelge 2'de, adezyon direnci için Çizelge 3 ve Çizelge 4'te görmek mümkündür.

Bir ağın tasarımı çıktığı büyük ölçüde etkilediği için önemlidir. En uygun ağ mimarisi girdi ve çıktı verileri arasındaki ilişkinin en iyi şekilde açıklandığının bir göstergesidir. Ancak, en iyi ağın belirlenmesi için kesin bir yöntem yoktur [42]. Bu çalışmada, en uygun ağ mimarisinin ve parametrelerinin belirlenmesinde YSA modellemelerinde en çok kullanılan yöntem olan deneme yanılma metodu kullanılmıştır. Denemelerde gizli katman sayıları ve gizli katman(lar)daki nöron sayıları geniş bir yelpazede değiştirilip, farklı parametreler (aktivasyon fonksiyonu, eğitim algoritması, öğrenme kuralı, performans fonksiyonları vb.) ve veri setleri kullanılarak değişik modeller kurulup sayısız denemeler yapıp eğitimler gerçekleştirilerek yüzey pürüzlülüğü ve adezyon direnci için en uygun ağ mimarisi ve tahmin modeli belirlenmiştir. Diğer bir ifade ile birçok farklı YSA yapıları ve parametreleri gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki fark en aza indirilene kadar denenmiştir. Sonuç olarak, deney sonuçlarına en yakın çıktıları veren modeller tahminler yapmak için seçilmiştir. Seçilen YSA mimarileri Şekil 3'te gösterilmiştir.

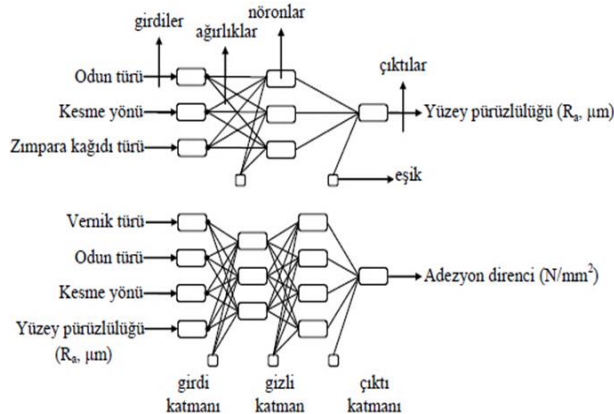
Çizelge 1. Yüzey pürüzlülüğü için kullanılan eğitim veri seti ve tahmin modeli sonuçları (Training data set used for surface roughness, and prediction model results)

| Odun türü | Kesme yönü | Zımpara kağıdı türü | Yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm) | | |
|---------------------|------------|---------------------|---|--------|----------|
| | | | Gerçek | Tahmin | Hata (%) |
| Fagus orientalis L. | Teğet | 80 | 4,50 | 4,50 | -0,08 |
| Fagus orientalis L. | Teğet | 120 | 3,14 | 3,09 | 1,63 |
| Fagus orientalis L. | Radyal | 120 | 3,01 | 3,04 | -1,03 |
| Fagus orientalis L. | Radyal | 180 | 2,07 | 2,08 | -0,37 |
| Pinus sylvestris L. | Teğet | 80 | 4,26 | 4,26 | 0,09 |
| Pinus sylvestris L. | Teğet | 180 | 2,55 | 2,68 | -5,26 |
| Pinus sylvestris L. | Radyal | 80 | 4,20 | 4,22 | -0,42 |
| Pinus sylvestris L. | Radyal | 120 | 3,68 | 3,61 | 1,93 |
| Prunus cerasus | Teğet | 120 | 3,34 | 3,38 | -1,14 |
| Prunus cerasus | Teğet | 180 | 2,65 | 2,53 | 4,68 |
| Prunus cerasus | Radyal | 80 | 4,08 | 4,08 | 0,09 |
| Prunus cerasus | Radyal | 180 | 1,98 | 1,99 | -0,26 |
| MAPE | | | 1,41 | | |
| RMSE | | | 0,06 | | |

Çizelge 2. Yüzey pürüzlülüğü için kullanılan test veri seti ve tahmin modeli sonuçları (Testing data set used for surface roughness, and prediction model results)

| Odun türü | Kesme yönü | Zımpara kağıdı türü | Yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm) | | |
|---------------------|------------|---------------------|---|--------|----------|
| | | | Gerçek | Tahmin | Hata (%) |
| Fagus orientalis L. | Teğet | 180 | 2,15 | 2,07 | 3,72 |
| Fagus orientalis L. | Radyal | 80 | 4,35 | 4,44 | -2,16 |
| Pinus sylvestris L. | Teğet | 120 | 3,67 | 3,65 | 0,47 |
| Pinus sylvestris L. | Radyal | 180 | 2,71 | 2,65 | 2,31 |
| Prunus cerasus | Teğet | 80 | 4,71 | 4,49 | 4,77 |
| Prunus cerasus | Radyal | 120 | 2,91 | 2,92 | -0,51 |
| MAPE | | | 2,32 | | |
| RMSE | | | 0,11 | | |

Yüzey pürüzlülüğü için 3 nörona sahip bir gizli katmanlı ağ mimarisi (3:3:1) ve adezyon direnci için ilk katmanında 3, ikinci katmanında 4 nöron bulunan iki gizli katmana sahip ağ mimarisi (4:3:4:1) tahminler yapmak için seçilmiştir. Modellerin en tutarlı sonucu verebilmesi için ağların yapısı genelleme yapabilecek en az nöron sayısı ile tasarlanmıştır.

**Şekil 3.** Tahmin modellerinin YSA mimarileri (ANN architectures of the prediction models)

Yüzey pürüzlülüğü ve adezyon direnci modellerinin belirlenmesinde ileri beslemeli ve geri yayımlı çok katmanlı YSA'lar kullanılmıştır. Önerilen modellerde, hiperbolik tanjant sigmoid fonksiyonu (tansig) gizli katman(lar)da ve doğrusal transfer fonksiyonu (purelin) çıktı katmanında transfer (aktivasyon) fonksiyonu olarak tercih edilmiştir. Eğitim algoritması olarak levenberg marquardt algoritması (trainlm) seçilmiş, öğrenme kuralı olarak momentumlu gradyan azaltım geri yayılım algoritması (traingdm) kullanılmış, performans fonksiyonu olarak da Eşitlik 3 ile hesaplanan ortalama karesel hata (MSE) tercih edilmiştir. Eşitlikte t_i , gerçek değeri; td_i , YSA ile tahmin edilen değeri; N , ise toplam ölçüm sayısını ifade etmektedir.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - td_i)^2 \quad (3)$$

Her bir parametrenin modellere eşit katkı sağlaması amacıyla eğitim ve test setindeki veriler, modellerde hiperbolik tanjant sigmoid fonksiyonu kullanıldığından (-1,1) aralığında normalize edilerek ilgili ağlara sunulmuş, daha sonra sonuçların yorumlanabilmesi için veriler ters normalize işlemine tabi tutulmak suretiyle orijinal değerlerine çevrilmiştir. Normalizasyon (ölçeklendirme) işlemleri Eşitlik 4 yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Eşitlikte X_{norm} , normalize edilmiş veriyi; X , değişkenin gerçek değerini; X_{min} , veri grubunun minimum değerini; X_{max} , ise veri grubunun maksimum değerini ifade etmektedir.

$$X_{norm} = 2 \times \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} - 1 \quad (4)$$

YSA'ların girdiler için doğru çıktıları üretecek hale gelmesi yani ağı eğitilmesi, bağlantı ağırlıklarının ve eşik değerlerinin belirlenmesi ile gerçekleşmektedir. Ağı doğru ağırlık değerine ulaşması, ağı genellemeler yapabilme yeteneğine kavuştuğunu diğer bir ifade ile ağı öğrendiğini gösterir. YSA'larda bilgi, ağıdaki bütün bağlantılar üzerine ağırlık değerleri ile dağılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve adezyon direnci tahmin modellerinin bağlantı ağırlıkları ve eşik değerleri sırasıyla Çizelge 5 ve Çizelge 6'da verilmiştir.

İyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan tanı vasıtaları (performans fonksiyonları) olan Eşitlik 5 ile hesaplanan ortalama mutlak yüzde hata (MAPE), Eşitlik 6 ile hesaplanan ortalama karesel hatanın karekökü (RMSE) ve Eşitlik 7 ile hesaplanan determinasyon katsayısı (R^2) dikkate alınarak en iyi tahmin değerlerini veren modeller tespit edilmiştir.

$$MAPE = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \left| \frac{t_i - td_i}{t_i} \right| \right) \times 100 \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - td_i)^2} \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - td_i)^2}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} \quad (7)$$

Çizelge 3. Adezyon direnci için kullanılan eğitim veri seti ve tahmin modeli sonuçları (Training data set used for adhesion strength, and prediction model results)

| Vernik türü | Odun türü | Kesme yönü | Yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm) | Adezyon direnci (N/mm^2) | | |
|-------------|---------------------|------------|--|-------------------------------------|--------|----------|
| | | | | Gerçek | Tahmin | Hata (%) |
| AC | Fagus orientalis L. | Teğet | 3,14 | 2,42 | 2,38 | 1,65 |
| AC | Fagus orientalis L. | Teğet | 2,15 | 2,28 | 2,27 | 0,30 |
| AC | Fagus orientalis L. | Radyal | 4,35 | 2,12 | 2,10 | 0,92 |
| AC | Fagus orientalis L. | Radyal | 2,07 | 1,76 | 1,83 | -4,16 |
| AC | Pinus sylvestris L. | Teğet | 4,26 | 2,48 | 2,53 | -1,91 |
| AC | Pinus sylvestris L. | Teğet | 3,67 | 2,44 | 2,46 | -0,86 |
| AC | Pinus sylvestris L. | Radyal | 3,68 | 2,14 | 2,06 | 3,78 |
| AC | Pinus sylvestris L. | Radyal | 2,71 | 1,95 | 1,95 | 0,20 |
| AC | Prunus cerasus | Teğet | 4,71 | 2,54 | 2,56 | -0,76 |
| AC | Prunus cerasus | Teğet | 2,65 | 2,07 | 2,07 | 0,20 |
| AC | Prunus cerasus | Radyal | 4,08 | 2,42 | 2,42 | 0,02 |
| AC | Prunus cerasus | Radyal | 2,91 | 2,25 | 2,25 | 0,04 |
| PU | Fagus orientalis L. | Teğet | 4,50 | 3,81 | 3,84 | -0,78 |
| PU | Fagus orientalis L. | Teğet | 3,14 | 3,55 | 3,50 | 1,43 |
| PU | Fagus orientalis L. | Radyal | 3,01 | 2,91 | 3,00 | -3,04 |
| PU | Fagus orientalis L. | Radyal | 2,07 | 2,92 | 2,85 | 2,49 |
| PU | Pinus sylvestris L. | Teğet | 4,26 | 3,05 | 3,01 | 1,27 |
| PU | Pinus sylvestris L. | Teğet | 2,55 | 2,62 | 2,67 | -1,88 |
| PU | Pinus sylvestris L. | Radyal | 4,20 | 2,96 | 2,92 | 1,26 |
| PU | Pinus sylvestris L. | Radyal | 3,68 | 2,67 | 2,69 | -0,86 |
| PU | Prunus cerasus | Teğet | 3,34 | 3,35 | 3,38 | -0,84 |
| PU | Prunus cerasus | Teğet | 2,65 | 3,31 | 3,28 | 0,96 |
| PU | Prunus cerasus | Radyal | 4,08 | 3,39 | 3,36 | 1,00 |
| PU | Prunus cerasus | Radyal | 1,98 | 3,15 | 3,19 | -1,27 |
| WB | Fagus orientalis L. | Teğet | 4,50 | 1,97 | 1,97 | 0,17 |
| WB | Fagus orientalis L. | Teğet | 2,15 | 1,65 | 1,65 | -0,11 |
| WB | Fagus orientalis L. | Radyal | 4,35 | 1,98 | 2,02 | -2,23 |
| WB | Fagus orientalis L. | Radyal | 3,01 | 1,77 | 1,73 | 2,27 |
| WB | Pinus sylvestris L. | Teğet | 3,67 | 1,85 | 1,85 | -0,04 |
| WB | Pinus sylvestris L. | Teğet | 2,55 | 1,82 | 1,81 | 0,31 |
| WB | Pinus sylvestris L. | Radyal | 4,20 | 4,10 | 4,10 | 0,04 |
| WB | Pinus sylvestris L. | Radyal | 2,71 | 2,73 | 2,73 | 0,03 |
| WB | Prunus cerasus | Teğet | 4,71 | 2,11 | 2,10 | 0,43 |
| WB | Prunus cerasus | Teğet | 3,34 | 1,96 | 1,97 | -0,37 |
| WB | Prunus cerasus | Radyal | 2,91 | 1,78 | 1,78 | -0,22 |
| WB | Prunus cerasus | Radyal | 1,98 | 1,64 | 1,64 | 0,11 |
| MAPE | | | | 1,06 | | |
| RMSE | | | | 0,04 | | |

Eşitlik 7'deki \bar{t} , tahmini değerlerin ortalamasını ifade etmektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

YSA modelleri, Söğütü ve ark. [34]'nın deney sonuçlarından elde edilen verilerle eğitilmiş ve test

edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve adezyon direnci YSA tahmin modellerinin tekrara (iterasyona) bağlı MSE değişimleri Şekil 4'te görülmekte olup, en iyi eğitim performansı yüzey pürüzlülüğü için 22. iterasyonda 0,0019588 ve adezyon direnci için 176. iterasyonda 0,00074997 olarak gerçekleşmiştir.

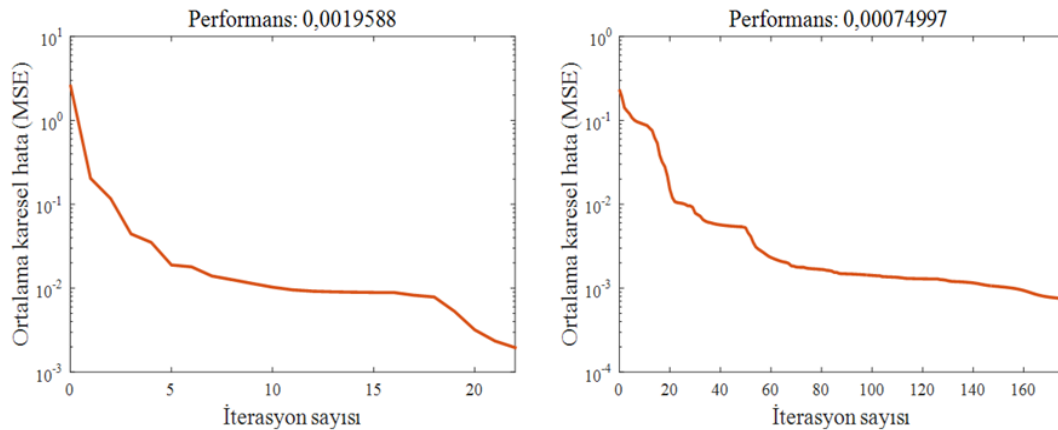
Çizelge 4. Adezyon direnci için kullanılan test veri seti ve tahmin modeli sonuçları (Testing data set used for adhesion strength, and prediction model results)

| Vernik türü | Odun türü | Kesme yönü | Yüzey pürüzlülüğü (R _a , µm) | Adezyon direnci (N/mm ²) | | |
|-------------|---------------------|------------|---|--------------------------------------|--------|----------|
| | | | | Gerçek | Tahmin | Hata (%) |
| AC | Fagus orientalis L. | Teğet | 4,50 | 2,44 | 2,53 | -3,65 |
| AC | Fagus orientalis L. | Radyal | 3,01 | 1,84 | 1,95 | -5,77 |
| AC | Pinus sylvestris L. | Teğet | 2,55 | 2,41 | 2,34 | 2,98 |
| AC | Pinus sylvestris L. | Radyal | 4,20 | 2,30 | 2,12 | 7,90 |
| AC | Prunus cerasus | Teğet | 3,34 | 2,32 | 2,31 | 0,32 |
| AC | Prunus cerasus | Radyal | 1,98 | 2,02 | 1,82 | 9,85 |
| PU | Fagus orientalis L. | Teğet | 2,15 | 3,47 | 3,27 | 5,64 |
| PU | Fagus orientalis L. | Radyal | 4,35 | 3,11 | 3,25 | -4,43 |
| PU | Pinus sylvestris L. | Teğet | 3,67 | 2,74 | 2,89 | -5,47 |
| PU | Pinus sylvestris L. | Radyal | 2,71 | 2,50 | 2,49 | 0,49 |
| PU | Prunus cerasus | Teğet | 4,71 | 3,79 | 3,54 | 6,62 |
| PU | Prunus cerasus | Radyal | 2,91 | 3,32 | 3,27 | 1,49 |
| WB | Fagus orientalis L. | Teğet | 3,14 | 1,94 | 1,80 | 7,31 |
| WB | Fagus orientalis L. | Radyal | 2,07 | 1,44 | 1,46 | -1,61 |
| WB | Pinus sylvestris L. | Teğet | 4,26 | 2,28 | 2,18 | 4,19 |
| WB | Pinus sylvestris L. | Radyal | 3,68 | 3,80 | 3,67 | 3,48 |
| WB | Prunus cerasus | Teğet | 2,65 | 1,91 | 1,90 | 0,55 |
| WB | Prunus cerasus | Radyal | 4,08 | 2,12 | 1,96 | 7,57 |
| MAPE | | | | 4,41 | | |
| RMSE | | | | 0,13 | | |

Önerilen YSA modellerinin performansını değerlendirmek için grafiksel ve istatistiksel karşılaştırmalar kullanılmıştır. Gerçek değerler, tahmin edilen değerler, yüzde hata oranları ile MAPE ve RMSE değerleri yüzey pürüzlülüğü için Çizelge 1 ve Çizelge 2'de, adezyon direnci için Çizelge 3 ve Çizelge 4'te verilmiştir. Grafiksel ve istatistiksel karşılaştırmalar, YSA modellerinin tatmin edici ve istikrarlı sonuçlar ürettiğini teyit etmektedir. Çizelgeler incelendiğinde YSA tahmin modellerinin kullanılması ile tahmin edilen

değerlerin gerçek değerlere çok yakın olduğu görülmektedir.

Tahmin modellerinin performansları hata değerleri (MAPE ve RMSE) dikkate alınarak değerlendirilmiştir. En iyi YSA modelinin seçiminde düşük MAPE ve RMSE değerleri dikkate alınmaktadır [43]. Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğü için MAPE eğitim safhasında %1,41 ve test safhasında %2,32 olmuştur. RMSE değerleri ise eğitim ve test safhaları için sırasıyla 0,06 ve 0,11 olarak hesaplanmıştır. Adezyon direnci tahmin modelinin



Şekil 4. Yüzey pürüzlülüğü (sol görüntü) ve adezyon direnci (sağ görüntü) için her bir iterasyonda MSE'nin değişimleri (Variations of the MSE at each iteration for surface roughness (left image) and adhesion strength (right image))

Çizelge 5. Yüzey pürüzlülüğü tahmin modelinin bağlantı ağırlıkları ve eşikleri (Connection weights and biases of the surface roughness prediction model)

| Gizli katman | | | Çıktı katmanı | | |
|--------------|----------|---------|---------------|---------|---------|
| Nöron 1 | Nöron 2 | Nöron 3 | Eşik 1 | Nöron 1 | Eşik 2 |
| -1,75754 | -0,16638 | 3,75657 | 3,60776 | 0,88197 | 0,49028 |
| -1,10578 | -0,00806 | 0,03065 | -0,73057 | 2,69293 | - |
| -0,12005 | -0,51846 | 1,86015 | 1,48438 | 0,42231 | - |

Çizelge 6. Adezyon direnci tahmin modelinin bağlantı ağırlıkları ve eşikleri (Connection weights and biases of the adhesion strength prediction model)

| Gizli katman 1 | | | | Gizli katman 2 | | | | Çıktı katmanı | | |
|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|---------------|----------|---------|
| Nöron 1 | Nöron 2 | Nöron 3 | Eşik 1 | Nöron 1 | Nöron 2 | Nöron 3 | Nöron 4 | Eşik 2 | Nöron 1 | Eşik 3 |
| 1,74575 | -4,73558 | 0,63597 | -1,42390 | 3,14862 | -1,78329 | -1,31055 | -3,87960 | -4,63173 | -3,58966 | 1,83177 |
| 0,58272 | -7,26481 | 0,02393 | 2,74052 | -0,38388 | 0,06705 | 1,25608 | -2,46479 | 2,87257 | -4,98043 | - |
| -0,25730 | -1,86899 | -0,12776 | 0,83927 | 0,97589 | -2,79390 | 0,51670 | 3,82539 | -1,74101 | 4,71426 | - |
| -0,04703 | 0,90159 | 0,09122 | - | - | - | - | - | -5,33601 | 4,29824 | - |

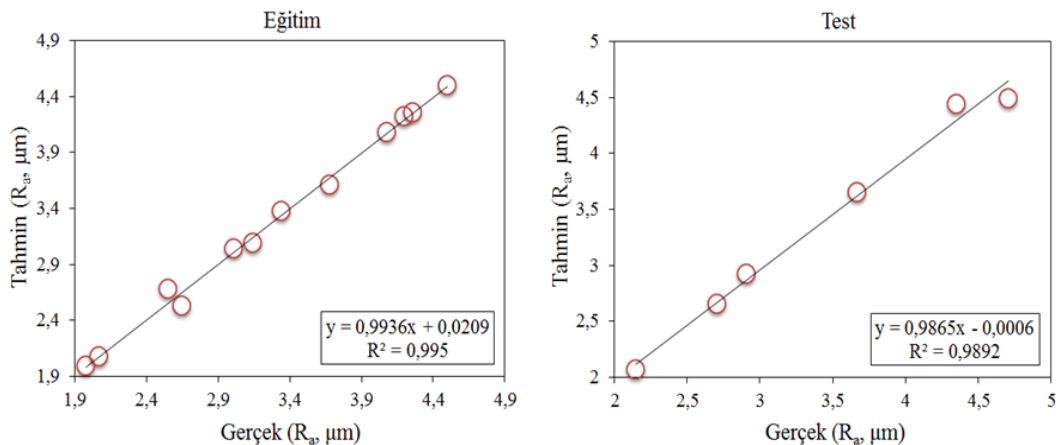
eğitim safhasındaki MAPE ve RMSE değerleri sırasıyla %1,06 ve 0,04 olmuş ve test safhasındaki MAPE ve RMSE değerleri sırasıyla %4,41 ve 0,13 olarak hesaplanmıştır. Bu hata düzeyleri YSA tahmin modellerinin etkili bir şekilde memnun edici sonuçlar ürettiğini ve yeterli doğruluk ve güvenilirliğe sahip olduklarını göstermektedir.

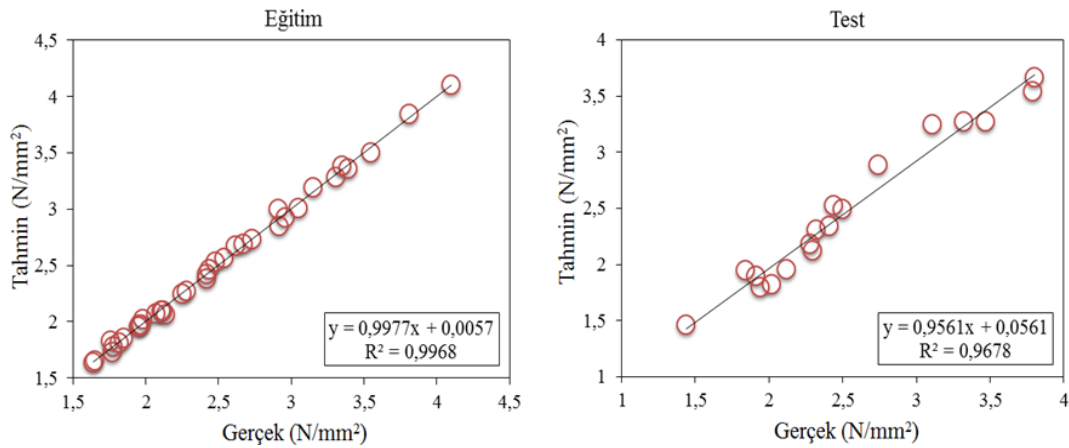
Tahmin edilen değerler ile ölçülen değerler arasındaki regresyon analizi genellikle ağların geçerliliğini ve doğruluğunu değerlendirmek için kullanılır. R^2 değerinin 1'e yaklaşması durumunda tahmin doğruluğu artmaktadır [18]. Bu durum, gerçek değerler ile tahmin edilen değerler arasında mükemmel bir uyum olduğunu ifade eder. Hesaplanan değerler ile gerçek değerler arasındaki ilişkileri gösteren diyagramlar Şekil 5 ve Şekil 6'da sunulmuştur. Şekillerden görüleceği üzere yüzey pürüzlülüğü ve adezyon direnci tahmin modellerinin test safhasındaki R^2 değerleri sırasıyla 0,9892 ve 0,9678 olmuştur. Bu değerler, elde edilen ağların yüzey pürüzlülüğünün gerçek verilerinin en az %98,92'sini ve

adezyon direncinin gerçek verilerinin en az %96,78'ini açıkladığını gösterir. Hesaplanan R^2 değerleri, geliştirilen modellerin iyi bir performansla sahip olduğunu kanıtlamış ve YSA'ların tahmin amaçlı kullanılabilirliğini desteklemiştir.

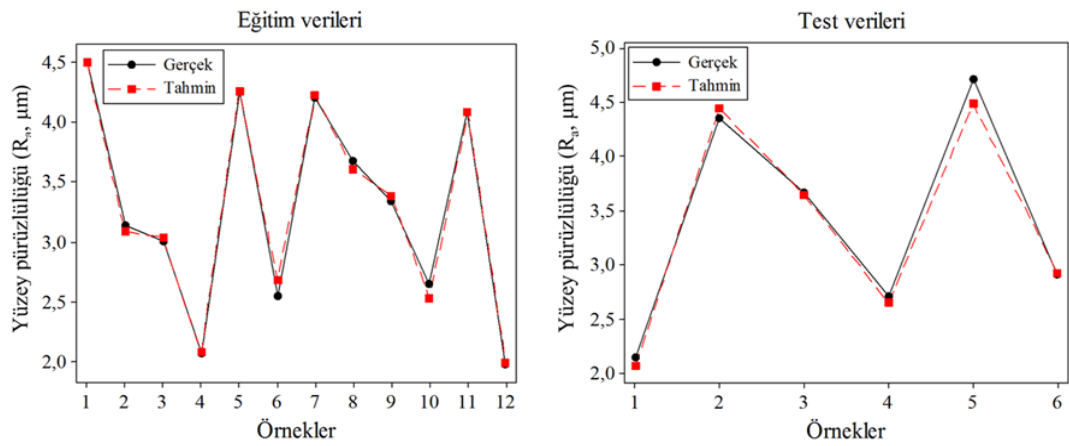
Şekil 7 ve Şekil 8, YSA tahmin modellerinin çıktıları ile deneysel sonuçları karşılaştırmaktadır. Şekillerden görüleceği üzere değerler birbirine çok yakındır. Deneysel sonuçlar ve tahmin edilen değerler arasındaki yüksek benzerlik önerilen YSA modellerinin güvenilirliğini arttırmaktadır.

Eğitilmiş YSA modeli optimizasyon çalışmaları için istenen ara değerleri sağlayabilir. Başka bir deyişle, iyi eğitilmiş model sayesinde daha fazla deneysel çalışma yürütmeden belirtilen girdi değerlerine karşılık gelen çıktıları yüksek doğrulukta tespit etmek mümkündür [44]. Parametrelerin bağımlı değişken üzerine etkilerinin tüm çıktıları çeşitli kombinasyonlar için YSA tarafından tahmin edilebilir. Bu çalışmada, deneylerde kullanılmayan 150 numaralı zımpara kağıdı türü ile farklı

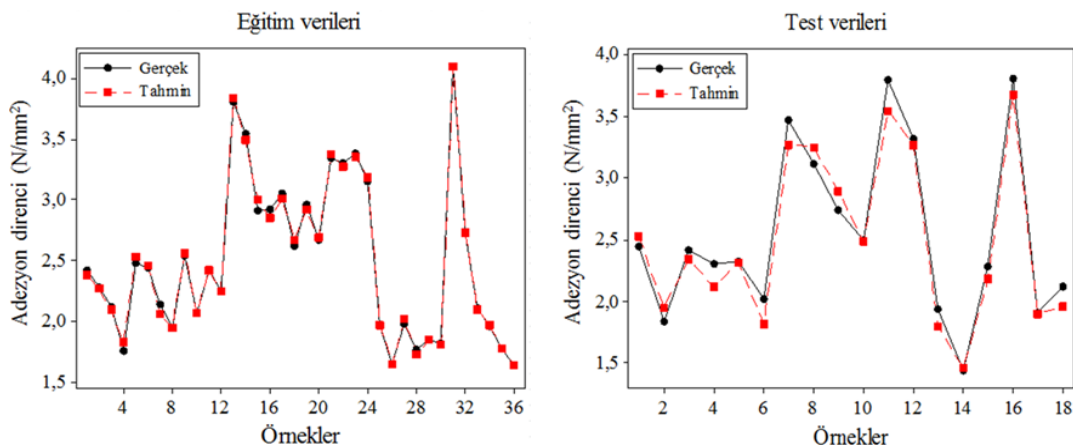
**Şekil 5.** Yüzey pürüzlülüğü için ölçülen sonuçlar ile tahmin edilen değerler arasındaki ilişki (The relationship between the measured results and the predicted values for surface roughness)



Şekil 6. Azezyon direnci için ölçülen sonuçlar ile tahmin edilen değerler arasındaki ilişki (The relationship between the measured results and the predicted values for adhesion strength)



Şekil 7. Yüze pürüzlülüğü için ölçülen ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması (The comparison of the measured and predicted values for surface roughness)



Şekil 8. Azezyon direnci için ölçülen ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması (The comparison of the measured and predicted values for adhesion strength)

odun türü (*Fagus orientalis* L., *Pinus sylvestris* L. ve *Prunus cerasus*) ve kesme yönü (teğet ve radyal) değerleri kullanılarak yüze pürüzlülüğü değerleri tahmin edilmiş ve Çizelge 7'de sunulmuştur. Çizelge 7 incelendiğinde 150 numaralı zımpara kağıdı türünde hem teğet hem de radyal yönde en yüksek yüze pürüzlülüğü

değerlerine sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) odununun sahip olduğu ve teğet yönde kesilen odunların yüze pürüzlülüğü değerlerinin radyal yönde kesilenlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Benzer sonuçlar bazı araştırmacılar tarafından da bildirilmiştir [45, 46].

Çizelge 7. 150 numaralı zımpara kağıdı için yüzey pürüzlülüğü değerleri (Surface roughness values for 150-grit sandpaper)

| Odun türü | Kesme yönü | Zımpara kağıdı türü | Yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm) |
|---------------------|------------|---------------------|---|
| Fagus orientalis L. | Teğet | 150 | 2,3264 |
| Fagus orientalis L. | Radyal | 150 | 2,2976 |
| Pinus sylvestris L. | Teğet | 150 | 3,0949 |
| Pinus sylvestris L. | Radyal | 150 | 3,0518 |
| Prunus cerasus | Teğet | 150 | 2,8498 |
| Prunus cerasus | Radyal | 150 | 2,3568 |

Çizelge 8. Farklı yüzey pürüzlülüğü değerleri için adezyon direncindeki değişim (The change in adhesion strength for different surface roughness values)

| Vernik türü | Odun türü | Kesme yönü | Zımpara kağıdı türü | Yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm) | Adezyon direnci (N/mm^2) |
|-------------|---------------------|------------|---------------------|---|--|
| AC | Fagus orientalis L. | Teğet | 150 | 2,3264 | 2,2924 |
| AC | Fagus orientalis L. | Radyal | 150 | 2,2976 | 1,8609 |
| AC | Pinus sylvestris L. | Teğet | 150 | 3,0949 | 2,3977 |
| AC | Pinus sylvestris L. | Radyal | 150 | 3,0518 | 1,9864 |
| AC | Prunus cerasus | Teğet | 150 | 2,8498 | 2,1553 |
| AC | Prunus cerasus | Radyal | 150 | 2,3568 | 2,0224 |
| PU | Fagus orientalis L. | Teğet | 150 | 2,3264 | 3,3128 |
| PU | Fagus orientalis L. | Radyal | 150 | 2,2976 | 2,8824 |
| PU | Pinus sylvestris L. | Teğet | 150 | 3,0949 | 2,7751 |
| PU | Pinus sylvestris L. | Radyal | 150 | 3,0518 | 2,3951 |
| PU | Prunus cerasus | Teğet | 150 | 2,8498 | 3,3094 |
| PU | Prunus cerasus | Radyal | 150 | 2,3568 | 3,2245 |
| WB | Fagus orientalis L. | Teğet | 150 | 2,3264 | 1,6796 |
| WB | Fagus orientalis L. | Radyal | 150 | 2,2976 | 1,5360 |
| WB | Pinus sylvestris L. | Teğet | 150 | 3,0949 | 1,7714 |
| WB | Pinus sylvestris L. | Radyal | 150 | 3,0518 | 3,0771 |
| WB | Prunus cerasus | Teğet | 150 | 2,8498 | 1,9191 |
| WB | Prunus cerasus | Radyal | 150 | 2,3568 | 1,6983 |

Çizelge 7’de sunulan sonuçların yanında, adezyon direnci üzerindeki diğer parametrelerin etkilerinin tüm çıktıları geliştirilen ikinci model yardımıyla belirlenmiştir. Elde edilen ikinci tahmin modeli ile zımpara kağıdı türüne (150) bağlı olarak vernik türü (AC, PU ve WB), odun türü (*Fagus orientalis* L., *Pinus sylvestris* L. ve *Prunus cerasus*), kesme yönü (teğet ve radyal) ve ilk tahmin modeli ile belirlenen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin (2,3264; 2,2976; 3,0949; 3,0518; 2,8498 ve 2,3568) değişmesi ile adezyon direncindeki değişimler tahmin edilmiş ve Çizelge 8’de sunulmuştur. Bu çizelgeden en yüksek adezyon direnci değerlerinin PU vernik kullanılması sonucunda elde edildiği görülmektedir. PU verniğin kullanılması durumunda yüksek adezyon direnci değerlerine ulaşılabileceği daha önce yapılan çalışmalarda da belirtilmiştir [4, 47, 48]. Bu durumun vernik üretiminde kullanılan sentetik reçine ile ağaç malzemenin selüloz bileşeni arasında kurulan güçlü kimyasal bağlardan kaynaklandığını söylemek mümkündür [48].

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, odun türü, kesme yönü ve zımpara kağıdı türü değişkenlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri ile vernik türü, odun türü, kesme yönü ve yüzey pürüzlülüğü değişkenlerinin adezyon direnci üzerine etkilerini modellemek için YSA modelleri geliştirilmiştir. Girdi ve çıktı parametreleri arasındaki karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkiler göz önünde bulundurulduğunda, modeller tarafından oldukça cesaret verici ve tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü tahmin modelinin test safhasındaki MAPE değeri %2,32, RMSE değeri 0,11 ve R^2 değeri 0,9892; adezyon direnci tahmin modelinin test aşamasındaki MAPE değeri %4,41, RMSE değeri 0,13 ve R^2 değeri 0,9678 olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları, zaman alıcı olan ve yüksek test maliyetleri gerektiren deneysel çalışmalara gerek kalmaksızın girdi değişkenlerinin değer aralığında odunun yüzey pürüzlülüğü ve adezyon direnci değerlerinin tahmin edilmesinde YSA modellemesinin kullanılabileceğini göstermiştir.

Geliştirilen YSA modellerinin tahmin sonuçları sayesinde deneysel araştırmalar için zaman, enerji ve maliyetin düşürülmesi mümkün olacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, makalede kullanılan verilerin sağlanmasından dolayı Dr. Cevdet Söğütü, Dr. Pascal Nzokou, İsmail Koç, Rahmi Tutgun ve Dr. Nihat Döngel'e teşekkür etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Priadi T. and Hiziroglu S., "Characterization of heat treated wood species", *Materials and Design*, 49: 575-582, (2013).
- [2] Akbiyik A., Lamanna A. J. and Hale W. M., "Feasibility investigation of the shear repair of timber stringers with horizontal splits", *Construction and Building Materials*, 21: 991-1000, (2007).
- [3] Hauptmann M., Müller U., Obersriebnig M., Gindl-Altmutter W., Beck A. and Hansmann C., "The optical appearance of wood related to nanoscale surface roughness", *BioResources*, 8: 4038-4045, (2013).
- [4] Kılıç M., "The effects of steaming of beech (*Fagus orientalis* L.) and sapele (*Entandrophragma cylindricum*) woods on the adhesion strength of varnish", *Journal of Applied Polymer Science*, 113: 3492-3497, (2009).
- [5] Vitosytė J., Ukvalbergienė K. and Keturakis G., "The effects of surface roughness on adhesion strength of coated ash (*Fraxinus excelsior* L.) and birch (*Betula* L.) wood", *Materials Science*, 18: 347-351, (2012).
- [6] Ratnasingam J. and Scholz F., "Optimal surface roughness for high-quality finish on rubberwood (*Hevea brasiliensis*)", *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64: 343-345, (2006).
- [7] Magoss E., "General regularities of wood surface roughness", *Acta Silvatica & Lignaria Hungarica*, 4: 81-93, (2008).
- [8] Sofuoğlu S. D. and Kurtoğlu A., "Effects of machining conditions on surface roughness in planing and sanding of solid wood", *Drvna Industrija*, 66: 265-272, (2015).
- [9] Burdurlu E., Usta İ., Ulupınar M., Aksu B. and Erarslan T. Ç., "The effect of the number of blades and the grain size of abrasives in planing and sanding on the surface roughness of European black pine and Lombardy poplar", *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 29: 315-321, (2005).
- [10] Singer H. and Özşahin Ş., "Employing an analytic hierarchy process to prioritize factors influencing surface roughness of wood and wood-based materials in the sawing process", *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 42: 364-371, (2018).
- [11] Hendarto B., Shayan E., Ozarska B. and Carr R., "Analysis of roughness of a sanded wood surface", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28: 775-780, (2006).
- [12] Haghbakhsh R., Adib H., Keshavarz P., Koolivand M. and Keshtkari S., "Development of an artificial neural network model for the prediction of hydrocarbon density at high-pressure, high-temperature conditions", *Thermochimica Acta*, 551: 124-130, (2013).
- [13] Ozsahin S. and Murat M., "Prediction of equilibrium moisture content and specific gravity of heat treated wood by artificial neural networks", *European Journal of Wood and Wood Products*, 76: 563-572, (2018).
- [14] Avramidis S. and Iliadis L., "Predicting wood thermal conductivity using artificial neural networks", *Wood and Fiber Science*, 37: 682-690, (2005).
- [15] Samarasinghe S., Kularisi D. and Jamieson T., "Neural networks for predicting fracture toughness of individual wood samples", *Silva Fennica*, 41: 105-122, (2007).
- [16] Castellani M. and Rowlands H., "Evolutionary feature selection applied to artificial neural networks for wood-veneer classification", *International Journal of Production Research*, 46: 3085-3105, (2008).
- [17] Ceylan İ., "Determination of drying characteristics of timber by using artificial neural networks and mathematical models", *Drying Technology*, 26: 1469-1476, (2008).
- [18] Özşahin Ş., "The use of an artificial neural network for modeling the moisture absorption and thickness swelling of oriented strand board", *BioResources*, 7: 1053-1067, (2012).
- [19] Ozsahin S., "Optimization of process parameters in oriented strand board manufacturing with artificial neural network analysis", *European Journal of Wood and Wood Products*, 71: 769-777, (2013).
- [20] Tiryaki S., Malkoçoğlu A. and Özşahin Ş., "Using artificial neural networks for modeling surface roughness of wood in machining process", *Construction and Building Materials*, 66: 329-335, (2014).
- [21] Tiryaki S., Özşahin Ş. and Aydın A., "Employing artificial neural networks for minimizing surface roughness and power consumption in abrasive machining of wood", *European Journal of Wood and Wood Products*, 75: 347-358, (2017).
- [22] Tiryaki S., Özşahin Ş. and Yıldırım İ., "Comparison of artificial neural network and multiple linear regression models to predict optimum bonding strength of heat treated woods", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 55: 29-36, (2014).
- [23] Tiryaki S., Bardak S. and Bardak T., "Experimental investigation and prediction of bonding strength of Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) bonded with polyvinyl acetate adhesive", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 29: 2521-2536, (2015).
- [24] Khanlou H. M., Sadollah A., Ang B. C., Kim J. H., Talebian S. and Ghadimi A., "Prediction and optimization of electrospinning parameters for polymethyl methacrylate nanofiber fabrication using response surface methodology and artificial neural networks", *Neural Computing & Applications*, 25: 767-777, (2014).
- [25] Abbot J. and Marohasy J., "Input selection and optimisation for monthly rainfall forecasting in Queensland, Australia, using artificial neural networks", *Atmospheric Research*, 138: 166-178, (2014).
- [26] Yadav A. K. and Chandel S. S., "Solar radiation prediction using Artificial Neural Network techniques: A review", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 33: 772-781, (2014).
- [27] Fathi M., Mohebbi M. and Razavi S. M. A., "Application of image analysis and artificial neural network to predict mass transfer kinetics and color changes of osmotically

- dehydrated kiwifruit", *Food and Bioprocess Technology*, 4: 1357-1366, (2011).
- [28] Canakci A., Ozsahin S. and Varol T., "Modeling the influence of a process control agent on the properties of metal matrix composite powders using artificial neural networks", *Powder Technology*, 228: 26-35, (2012).
- [29] Ariana M. A., Vaferi B. and Karimi G., "Prediction of thermal conductivity of alumina water-based nanofluids by artificial neural networks", *Powder Technology*, 278: 1-10, (2015).
- [30] Hamzehie M. E., Fattahi M., Najibi H., Van der Bruggen B. and Mazinani S., "Application of artificial neural networks for estimation of solubility of acid gases (H₂S and CO₂) in 32 commonly ionic liquid and amine solutions", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 24: 106-114, (2015).
- [31] Monjezi M., Hasanipanah M. and Khandelwal M., "Evaluation and prediction of blast-induced ground vibration at Shur River Dam, Iran, by artificial neural network", *Neural Computing & Applications*, 22: 1637-1643, (2013).
- [32] Roy S., Banerjee R. and Bose P. K., "Performance and exhaust emissions prediction of a CRDI assisted single cylinder diesel engine coupled with EGR using artificial neural network", *Applied Energy*, 119: 330-340, (2014).
- [33] Yildirim I., Ozsahin S. and Akyuz K. C., "Prediction of the financial return of the paper sector with artificial neural networks", *BioResources*, 6: 4076-4091, (2011).
- [34] Söğütlü C., Nzokou P., Koc I., Tutgun R. and Döngel N., "The effects of surface roughness on varnish adhesion strength of wood materials", *Journal of Coatings Technology and Research*, 13: 863-870, (2016).
- [35] TS 2470, "Wood-Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests", (1976).
- [36] TS 2471, "Wood, determination of moisture content for physical and mechanical tests", (2005).
- [37] ASTM-D 1667-87, "Standard methods for conducting machining tests of wood and wood-base materials", (1999).
- [38] ISO 4287, "Geometrical product specifications surface texture profile method terms, definitions and surface texture parameters", (1997).
- [39] TS 2495 EN ISO 3274, "Geometrical product specifications (GPS)-Surface texture: Profile method-Nominal characteristics of contact (stylus) instruments", (2005).
- [40] ASTM-D 3023, "Standard practice for determination of resistance of factory applied coatings on wood products to stains and reagents", (1998).
- [41] TS EN ISO 4624, "Paints and varnishes-pull-off test for adhesion", (2006).
- [42] Seyhan M., Akansu Y. E., Murat M., Korkmaz Y. and Akansu S. O., "Performance prediction of PEM fuel cell with wavy serpentine flow channel by using artificial neural network", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 25619-25629, (2017).
- [43] Küçükönder H., Boyacı S. and Akyüz A., "A modeling study with an artificial neural network: developing estimation models for the tomato plant leaf area", *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 40: 203-212, (2016).
- [44] Varol T., Canakci A. and Ozsahin S., "Prediction of effect of reinforcement content, flake size and flake time on the density and hardness of flake AA2024-SiC nanocomposites using neural networks", *Journal of Alloys and Compounds*, 739: 1005-1014, (2018).
- [45] Söğütlü C., "Bazı faktörlerin zımparalanmış ağaç malzeme yüzey pürüzlülüğüne etkisi", *Politeknik Dergisi*, 8: 345-350, (2005).
- [46] Aslan S., Coşkun H. and Kılıç M., "The effect of the cutting direction, number of blades and grain size of the abrasives on surface roughness of Taurus cedar (*Cedrus Libani A. Rich.*) woods", *Building and Environment*, 43: 696-701, (2008).
- [47] Altun S. and Esmer M., "Isıl işlemin bazı ağaç malzemelerde yüzey pürüzlülüğü ve vernik yapışma direncine etkisi", *Politeknik Dergisi*, 20: 231-239, (2017).
- [48] Budakçı M. and Sönmez A., "Determining adhesion strength of some wood varnishes on different wood surfaces", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25: 111-118, (2010).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Türkiye’de konut tipi binaların ısıtma yükü altında ömür maliyet analizi yöntemi ile optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesi

Determination of optimum insulation thickness based on heating load by life-cycle cost analysis for residential buildings in Turkey

Yazar(lar) (Author(s)): Nusret AYDIN¹, Atilla BIYIKOĞLU²

ORCID¹: 0000-0003-1280-4631

ORCID²: 0000-0002-2133-6721

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Aydın N. ve Bıyıkoğlu A., “Türkiye’de konut tipi binaların ısıtma yükü altında ömür maliyet analizi yöntemi ile optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 901-911, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.435773

Türkiye’de Konut Tipi Binaların Isıtma Yükü Altında Ömür Maliyet Analizi Yöntemi ile Optimum Yalıtım Kalınlıklarının Belirlenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Nusret AYDIN^{1*}, Atilla BIYIKOĞLU²

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Silah Sistemleri Mühendisliği, Ankara, TÜRKİYE

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği, Ankara, TÜRKİYE

(Geliş/Received : 22.06.2018 ; Kabul/Accepted : 18.12.2018)

ÖZ

Binalarda yalıtım kalınlığı, bina kabuğunun tasarımında önemli bir parametredir. Binalarda yalıtım kalınlığının belirlenmesinde, ömür maliyet analizi sıklıkla kullanılan bir optimizasyon yöntemidir. Literatürde, yakıt maliyeti ve yalıtım maliyetinden oluşan toplam maliyetin minimum olduğu yalıtım kalınlığı, optimum yalıtım kalınlığı olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmanın amacı, Türkiye’deki konut tipi binalar için ısıtma etkisi altında optimum yalıtım kalınlıklarının ömür maliyet analizi yöntemi ile belirlenmesidir. Binaların yıllık ısıtma enerji ihtiyacı TS 825 “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” standardına göre hesaplanmıştır. Yalıtım malzemesi olarak; tavanda cam yünü, tabanda ekstrüde polistiren (XPS) ve dış duvarlarda genişletilmiş polistiren (EPS), yakıt olarak doğalgaz kullanılmıştır. Optimizasyon metodu olarak toplam maliyete dayalı optimizasyon yaklaşımını temel alan ömür maliyet analizi metodu kullanılmıştır. Optimum yalıtım kalınlıkları (U-değerleri), 30 yıllık kullanım ömrü için iklim bölgelerine göre; dış duvar için 8,1 cm ile 16,4 cm (0,38-0,20 W/m²K), tavan için 14,2 cm ile 26,8 cm (0,29-0,16 W/m²K), zemin için 5,0 ile 9,8 cm (0,57-0,32 W/m²K) arasında hesaplanmıştır. Sonuç olarak, TS 825 standardında belirtilen limit yalıtım kalınlıkları ile karşılaştırıldığında, optimum yalıtım kalınlıkları kullanılarak yalıtım yapılan bir binanın ülke genelinde sağlayacağı enerji tasarrufunun bölgelere göre %10,08 ile %18,88 arasında değiştiği belirlenmiştir. Geri ödeme sürelerindeki artışların en kötü durumda bile %10 değerini geçmediği düşünüldüğünde, TS 825 standardında belirtilen dört farklı iklim bölgesi için optimum yalıtım kalınlıklarının (U-değerlerinin) revize edilmesinde gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Optimum yalıtım kalınlığı, ısı yalıtımı, TS 825 Standardı, ömür maliyet analizi.

Determination of Optimum Insulation Thickness Based on Heating Load by Life-Cycle Cost Analysis for Residential Buildings in Turkey

ABSTRACT

The insulation thickness of the building is an important parameter in the design of the building envelope. Life-cycle cost analysis is often used as an optimization method in determining the thickness of the insulation in buildings. In literature, the insulation thickness which the total cost is minimum is defined as the optimum insulation thickness. In this study, the optimum insulation thicknesses of residential buildings in Turkey were determined by life-cycle cost analysis (LCCA). The annual heating energy requirement of the buildings are calculated according to the Turkish Standard 825, Thermal Insulation Requirements for Buildings. Glass wool, extruded polystyrene (XPS) and expanded polystyrene (EPS) are used for ceiling, floor and wall as insulation material respectively and natural gas is used as fuel. Life-cycle cost analysis based on the total cost approach is used as the optimization method. Optimum insulation thicknesses (U-values) based on climate zones for a period of 30 years are calculated between 14,2 cm and 26,8 cm (0,29-0,16 W/m²K) for ceiling, 5,0 cm and 9,8 cm (0,57-0,32 W/m²K) for floor, 8,1 cm and 16,4 cm (0,38-0,20 W/m²K) for wall. As a result, when compared with the limited insulation thicknesses specified in TS 825 standard, it has been determined that the energy savings to be provided by an insulation building using optimum insulation thicknesses vary between 10,08% and 18,88% according to the region. These results have reached the conclusion that optimum insulation thicknesses (U-values) should be revised for all regions specified in the TS 825 standard, as the increase in payback period is considered not to exceed 10% even in the worst case.

Keywords: Optimum insulation thickness, thermal insulation, TS 825 standard, life-cycle cost analysis.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde insan nüfusu ve tüketimi hızla çoğalmakta, buna paralel olarak enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Bunun sonucunda enerji günümüzün en

stratejik unsuru haline gelmiştir. Yeterli kaynaklara sahip olmayan ülkelerin en önemli sorunlarının başında enerji ihtiyacı gelmektedir. Ayrıca, sanayileşme ve teknolojinin gelişmesiyle kişi başına düşen enerji tüketiminin artması, çevre kirliliği ve küresel ısınma gibi çevresel sorunların hızla büyümesine neden olmaktadır. Hızlı tüketim ve

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : nusretayd@yahoo.com

kısıtlı enerji kaynakları nedeniyle enerji fiyatları her geçen gün daha da artmaktadır.

Enerjinin daha verimli kullanılması ancak enerjinin korunması ile mümkün olmaktadır. Türkiye’de enerjinin yaklaşık % 35’i, toplam elektrik tüketiminin ise yaklaşık % 43’ü konutlarda kullanılmaktadır [1]. Konutlarda tüketilen bu enerjinin % 65’i ise ısıtma amacıyla harcanmaktadır [1]. İnşaat sektöründeki gelişmeler göz önüne alındığında, gelecekte ısınma için kullanılan enerji miktarının daha da artması beklenmektedir. Bu nedenle, enerji tasarrufu, kullanılan enerjinin çoğunu ithal eden ülkemiz için çok daha önemlidir. Avrupa Birliği ülkeleriyle karşılaştırıldığında, ülkemizde konutlarda kullanılan enerji oranı oldukça yüksektir. Yapılan araştırmalar; ülkemizde binalarda kullanılan enerji miktarının Avrupa Birliği ülkeleri seviyesine indirilmesi durumunda, ortalama % 30 ile 40 oranında enerji tasarrufunun mümkün olduğu göstermektedir [2].

Literatürde optimum yalıtım kalınlığı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. En basit ve sık kullanılan model, derece-gün yöntemidir. Optimum yalıtım kalınlığının hesaplanmasında bir diğer yöntem de, derece gün metodundan entegre edilen ekonomik P1-P2 modelidir. Literatürde sayısal yöntemlere dayalı dinamik geçiş modelleri de mevcuttur. Bazı çalışmalarda Fourier Serisi analizine dayanan analitik yöntemler uygulanmıştır [3].

Binalarda yalıtım kalınlığı, bina kabuğunun tasarımında önemli bir parametredir. Düşük yalıtım kalınlığı, ısının daha hızlı aktarılmasına sebep olarak ısı konfor ve enerji tasarrufu üzerinde olumsuz bir etki oluşturur. Binalarda, artan yalıtım kalınlığı ile ısı kaybı, dolayısıyla yakıt maliyeti azalır. Ancak, yalıtım kalınlığının artması yalıtım maliyetinin de artması demektir. Yakıt ve yalıtım maliyetinin toplamından oluşan toplam maliyet, belirli bir değere kadar azalır; bu seviyeden sonra tekrar artar. Dolayısıyla yalıtım kalınlığı için optimum bir değer söz konusudur. Bu optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesinde, zaman önemli bir parametredir. Optimizasyon süresi optimum yalıtım kalınlığını önemli ölçüde değiştirmektedir. Avrupa Birliği’nde (AB) binaların enerji talebini sınırlamaya yönelik gereksinimleri ve hesaplama kurallarını içeren temel yasal düzenleme Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği (EPBD)’dir [4]. EPBD için çıkarılan tüzük ve kılavuzlara göre, Avrupa Birliği (AB), konut ve kamu binaları için 30, ticari ve konut dışı binalar için 20 yıllık bir hesaplama periyodunu kullanmayı öngörmektedir [5]. Maliyet optimizasyonu ve yaklaşık sıfır enerjili bina (nZEB), Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği’nde yer alan iki temel kavramdır.

Hasan [6], yaptığı çalışmada optimum yalıtım kalınlığı hesabı için derece-gün metodu ile birlikte ömür maliyet analizini kullanmıştır. Filistin’deki konutlar için yaptığı çalışmada, hesapladığı optimum yalıtım kalınlığıyla dış duvarların yalıtılması durumunda 10 yıllık bir zaman zarfında yaklaşık 21 \$/m² enerji tasarrufu elde edilebileceğini belirlemiştir. Geri ödeme sürelerinin, polistiren malzeme için 1-1,7 yıl, taş yünü için ise 1,3-2,3

yıl arasında değiştiğini raporlamıştır. Çomaklı ve Yüksel [7], Erzurum, Erzincan ve Kars şehirlerindeki binalarda EPS kullanarak dış duvar yalıtımı için optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. 10 yıllık bir kullanım ömrü için, yalıtım malzemesi olarak EPS ve yakıt olarak kömür kullanıldığında, dış duvar için optimum yalıtım kalınlıklarını Erzurum için 0,10 m, Kars için 0,10 m ve Erzincan için 0,08 m olarak belirlemişlerdir. Özel [8], Elazığ ili için optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve geri ödeme sürelerini üç farklı yakıt türü için hesaplamıştır. Doğalgaz, ithal kömür ve fuel-oil için optimum dış duvar yalıtım kalınlıklarını sırasıyla 0,04, 0,045 ve 0,075 m olarak hesaplamıştır. İnallı ve arkadaşları [9] çalışmalarında, İzmir, Diyarbakır, Uşak ve Bayburt olmak üzere dört farklı derece-gün bölgesinden birer şehir için TS 825 standardını kullanarak optimum yalıtım kalınlıklarını belirlemişlerdir. Dış duvar için optimum yalıtım kalınlıklarının 0,038 cm ile 0,144 cm arasında değiştiğini hesaplamışlardır. Dikmen [10] çalışmasında, Dinar’ın köylerinde inşa edilmiş olan afet konutlarını TS 825 Standardına uygunluğu açısından incelemiştir. TS 825 standardını kullanarak yaptığı hesaplamalar sonucunda, çatı için 12 cm kalınlıkta cam yünü, duvar için 8 cm kalınlıkta EPS ve toprağa oturan döşeme için 7 cm kalınlıkta XPS kullanılması gerektiğini belirlemiştir. Kürekçi [11] çalışmasında, Türkiye’nin 81 il merkezi için dört farklı yakıt (doğalgaz, kömür, fuel-oil ve LPG) ve beş farklı yalıtım malzemesi (XPS, EPS, cam yünü, taş yünü ve poliüretan) kullanarak optimum yalıtım kalınlıklarını hesaplamıştır. Bu hesaplamalarını sadece ısıtma yükü, sadece soğutma yükü ve ısıtma ile soğutma yükünün birlikte olduğu durumlar için 10 yıllık bir optimizasyon süresi için yapmıştır.

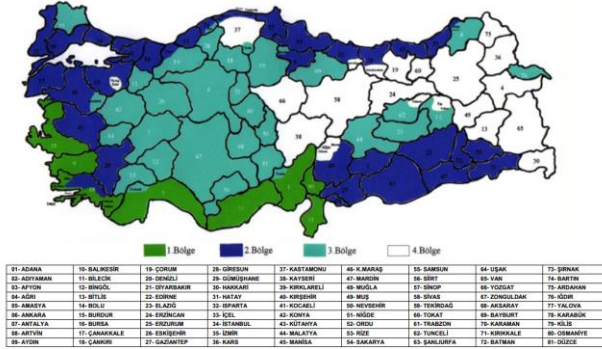
Mevcut literatür incelendiğinde, yapılan çalışmalarda genellikle derece gün metodu kullanıldığı, ömür maliyet analizinin 10 yıllık bir zaman dilimi için yapıldığı ve dış duvarlar için optimum yalıtım kalınlıklarının hesaplandığı görülmektedir.

Bu çalışmada, Türkiye’deki binalar için minimum enerji performans gerekliliklerinin optimum maliyet seviyelerinin hesaplanması için EPBD’ye dayanan bir yöntem kullanılmıştır. Referans binaların yıllık enerji ihtiyacı, TS 825 standardına göre hesaplanmıştır [12]. Türkiye’de dört bölge için optimum U-değerleri, optimum yalıtım kalınlığı, yakıt tasarrufu, net kazanç ve geri ödeme süreleri, konut tipi binalar için 30 yıllık bir süre dikkate alınarak hesaplanmıştır. Optimum yalıtım kalınlıkları; dış duvar, tavan ve taban için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Doğalgaz, ısıtma için enerji kaynağı olarak seçilmiştir. Tavan için ısı iletim katsayısı 0,045 W/m²K olan cam yünü, taban için ısı iletim katsayısı 0,035 W/m²K olan XPS ve dış duvar için ısı iletim katsayısı 0,035 W/m²K olan EPS yalıtım malzemesi olarak kullanılmıştır.

TS 825’e göre, Türkiye, Şekil 1’de gösterildiği gibi, ortalama sıcaklık değerlerine göre dört farklı iklim

bölgesine ayrılmıştır. TS 825 standardına göre DG1 en soğuk, DG4 ise en sıcak bölgedir. Hesaplamalar Türkiye'nin farklı iklime sahip dört bölgesi için yapılmıştır. TS 825 standardında tavan, taban ve dış duvar için belirtilen limit U-değerleri, hesaplanan optimum değerlerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. TS 825 Standardına göre DG bölgeleri (Climate regions of Turkey according to the TS 825 standard)

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Hesaplamalar için Excel programında bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım kullanılarak farklı yalıtım kalınlıklarına karşı gelen, yıllık enerji ihtiyaçları ve yalıtım maliyetleri hesaplanmıştır. 30 yıllık bir süre için ömür maliyet analizi yapılarak, yalıtım maliyeti ve yakıt maliyetinden oluşan toplam maliyetin minimum olduğu optimum yalıtım kalınlıkları ve optimum U-değerleri belirlenmiştir. Hesaplamalar tavan, taban ve dış duvarlar için ayrı yapılmıştır. Hesaplamalar her bir DG bölgesi için tekrarlanmıştır.

2.1. Bina Zarfının Yapısı (The Structure of Building Envelope)

Binalarda ısı kayıpları ve kazançlar genellikle dış duvar, tavan, zemin, pencere ve havalandırma yoluyla gerçekleşir. Bu çalışmada, bina zarfı ve havalandırma yoluyla oluşan ısı kayıpları ve kazançlar dikkate alınarak binanın yıllık ısıtma ihtiyacı belirlenmiştir. Hesaplamalar, aynı referans bina için dört farklı DG bölgesinde yapılmıştır.

Dış duvar, tavan ve taban yüzeylerini oluşturan zarf bileşenleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Bina yalıtımında, kullanım alanına (dış duvar, tavan, taban) göre en yüksek pazar payına sahip yalıtım malzemesi tercih edilmiştir. Çatı yalıtımında %70 pazar payına sahip cam yünü, döşeme yalıtımında %85 pazar payına sahip XPS ve dış duvar yalıtımında %80 pazar payına sahip EPS yalıtım malzemesi olarak belirlenmiştir [13]. Dış duvar, tavan ve taban bileşenlerinin fiziksel özellikleri ile ısı direnç değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1'de sunulan ısı iletim katsayıları ve ısı direnç değerleri TS 825 standardından alınmıştır [12].

Bu çalışmada kullanılan referans binanın fiziksel özellikleri ile pencere tipi Çizelge 2'de verilmiştir.

2.2. Yıllık Isıtma Enerjisi İhtiyacının Hesaplanması (Calculation of annual energy requirement for heating)

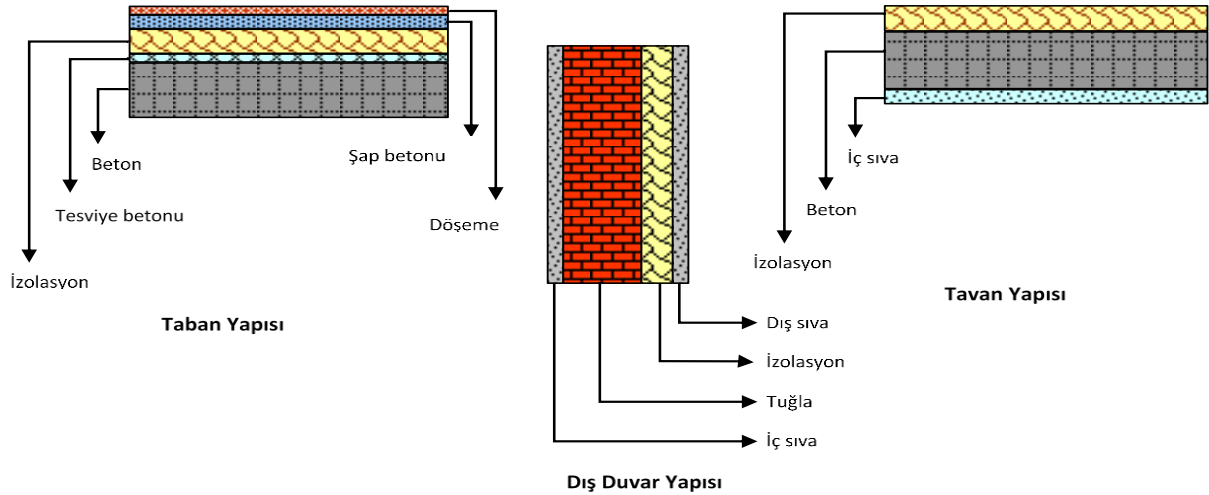
TS 825 standardında tanımlanan hesap metoduna göre, bir yapının yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı (Q_{yil}), aylık net ısı ihtiyaçlarının toplanmasıyla bulunur.

$$Q_{yil} = \sum Q_{ay} \quad (1)$$

Aylık net ısı ihtiyacı (Q_{ay}), iç ortamda belli bir konfor sıcaklığını sağlamak için gereken ısı enerjisi olup binanın aylık toplam ısı kayıplarından, aylık iç ve güneş enerji kazançları toplamını çıkartmak suretiyle hesaplanır.

Çizelge 1. Yapı malzemelerinin fiziksel özellikleri (The physical properties of building materials)

| Duvar Yapısı | Kalınlık (m) | λ (W/mK) | R (m ² K/W) |
|--------------------------------|--------------|------------------|------------------------|
| İç Sıva | 0,02 | 0,7 | 0,029 |
| Tuğla | 0,19 | 0,45 | 0,422 |
| Genişletilmiş Polistiren (EPS) | x | 0,035 | x/0,035 |
| Dış Sıva | 0,008 | 0,38 | 0,021 |
| R _i | | | 0,13 |
| R _e | | | 0,04 |
| Tavan Yapısı | Kalınlık (m) | λ (W/mK) | R (m ² K/W) |
| İç Sıva | 0,02 | 0,7 | 0,029 |
| Beton | 0,12 | 2,5 | 0,048 |
| Cam yünü | x | 0,045 | x/0,045 |
| R _i | | | 0,13 |
| R _e | | | 0,04 |
| Taban Yapısı | Kalınlık (m) | λ (W/mK) | R (m ² K/W) |
| Beton | 0,12 | 2,5 | 0,048 |
| Tesviye Betonu | 0,02 | 1,4 | 0,014 |
| Ekstrude Polistiren (XPS) | x | 0,035 | x/0,035 |
| Şap Betonu | 0,03 | 1,4 | 0,021 |
| Döşeme | 0,005 | 0,23 | 0,022 |
| R _i | | | 0,17 |
| R _e | | | 0 |



Şekil 2. Bina zarfının yapısı (The structure of the building envelope)

Çizelge 2. Bina özellikleri (The building properties)

| Bina Özellikleri | Değer | Bina Özellikleri | Değer |
|--|-------|--|-------|
| A/V | 0,30 | Güney yönündeki toplam pencere alanı, $A_{P,g}$ (m ²) | 198 |
| Bina kullanım amacı | Konut | Doğu yönündeki toplam pencere alanı, $A_{P,d}$ (m ²) | 142 |
| Bina kat sayısı | 10 | Batı yönündeki toplam pencere alanı, $A_{P,b}$ (m ²) | 142 |
| Bina eni (m) | 15 | Kuzey yönündeki toplam pencere alanı, $A_{P,k}$ (m ²) | 86 |
| Bina boyu (m) | 20 | Toplam pencere alanı, A_P (m ²) | 568 |
| Kat yüksekliği (m) | 2,80 | Dış havaya açık toplam dış duvar alanı, A_D (m ²) | 980 |
| Pencereler 12 mm aralıklı çift camlı | PVC | Dış havaya açık taşıyıcı betonarme alanı, A_B (m ²) | 412 |
| Havalandırma | Doğal | Toplam cephe alanı, A_C (m ²) | 1392 |
| Taban alanı, A_t (m ²) | 300 | Isı kaybeden toplam yüzey alanı A_{top} (m ²) | 2560 |
| Tavan alanı, A_T (m ²) | 300 | Bina kullanım alanı, A_n (0,32xV _{brüt}) (m ²) | 2688 |
| Binanın brüt hacmi, $V_{brüt}$ (m ³) | 8400 | Havalandırılan Alan, V_h (0,8xV _{brüt}) (m ³) | 6720 |

Aylık ısıtma enerjisi gereksinimi (Q_{ay}) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır;

$$Q_{ay} = [H(\theta_i - \theta_e) - \eta_{ay}(\Phi_{i,ay} + \Phi_{s,ay})] \times t \quad (2)$$

Bu eşitlikte; aylık ısıtma enerji ihtiyacı, Q_{ay} (kWh/m²), binanın özgül ısı kaybı H (W/K), aylık ortalama iç sıcaklık θ_i (°C), aylık ortalama dış sıcaklık θ_e (°C), kazançların aylık ortalama kullanım faktörü η_{ay} , aylık ortalama iç kazançlar $\Phi_{i,ay}$ (W), aylık ortalama güneş enerjisi kazancı $\Phi_{s,ay}$ (W), zaman t (s) (saniye olarak bir ay = 86400 x 30) olarak ifade edilmiştir. Binanın özgül ısı kaybı H (W/K), aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır;

$$H = H_T + H_v \quad (3)$$

Bu eşitlikte; iletim ve taşınım ile olan ısı kaybı H_T (W/K), havalandırma yoluyla olan ısı kaybı H_v (W/K) olarak ifade edilir. İletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı aşağıdaki eşitlikle hesaplanır;

$$H_T = \sum AU + IU_I \quad (4)$$

İletim ile olan ısı kaybı hesaplamalarında ısı köprülerinden meydana gelen ısı kayıpları, IU_I ihmal edilmiştir.

$$\sum AU = U_D A_D + U_P A_P + 0,8 U_T A_T + 0,5 U_t A_t \quad (5)$$

Bu eşitlikte; Dış duvarın ısı transfer katsayısı U_D (W/m²K), Pencerelerin ısı transfer katsayısı U_P (W/m²K), Tavanın ısı transfer katsayısı U_T (W/m²K), Tabanın ısı transfer katsayısı U_t (W/m²K), Duvar alanı A_D (m²),

Pencerelerin alanı A_P (m²), Tavan alanı A_T (m²), Taban alanı A_t (m²) olarak ifade edilir. Havalandırma yoluyla ısı kaybı aşağıdaki eşitlikle hesaplanır;

$$H_v = 0,33 \times n_h \times (0,8 \times V_{brüt}) \quad (6)$$

Bu eşitlikte; hava değişim oranı n_h (h⁻¹), binanın ısıtılan brüt hacmi $V_{brüt}$ (m³) olarak ifade edilir.

Eş. 2'de, aylık ısıtma enerji ihtiyacının negatif (-) olduğu aylarda enerji ihtiyacı sıfır (0) olarak kabul edilir ve yıllık ısıtma enerji ihtiyacının hesaplanmasında dikkate alınmaz. Eş. 2'de yer alan aylık kazanç kullanım faktörü aşağıdaki eşitlikle hesaplanır;

$$\eta_{ay} = 1 - e^{\frac{-1}{KKO_{ay}}} \quad (7)$$

Burada, KKO_{ay} kazanç/kayıp oranıdır ve aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$KKO_{ay} = \frac{(\Phi_{i,ay} + \Phi_{s,ay})}{H(\theta_i - \theta_e)} \quad (8)$$

KKO_{ay} oranı 2,5 ve üzerinde olduğu durumlarda o ay için ısıtma enerjisi ihtiyacı olmadığı kabul edilmiştir. Bu çalışmada konut tipi bina için hesaplamalar yapıldığından; ortalama iç ortam sıcaklığı $\theta_i=19^\circ\text{C}$ alınmıştır [12]. Ortalama aylık dış ortam sıcaklıkları DG bölgelerine göre TS 825 standardından alınmıştır [12]. Hesaplama yönteminde kullanılan kabuller aşağıda özetlenmiştir;

Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı hesabında, hava değişim sayısı, $n_h=0,8$ (h^{-1}) olarak alınmıştır. Binanın aylık ortalama iç kazancı, $\Phi_{i,ay}=5$ W/m^2 olarak alınmıştır. Binanın aylık ortalama güneş enerjisi kazanç hesabında, saydam yüzeylerin aylık ortalama gölgeleme faktörü ($r_{i,ay}$), 0,8 olarak alınmıştır. Ortalama aylık güneş ışınımı şiddeti ($I_{i,ay}$), tüm bölgeler için bina yönlerine göre sabit kabul edilerek TS 825 standardından alınmıştır[12]. Camlar için düzeltme faktörü, $F_w=0,80$ ve laboratuvar şartlarında ölçülen cam yüzeyine dik olarak gelen ışın için güneş enerjisi geçirme faktörü, $g_{\perp}=0,75$ olarak alınmıştır.

Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı hesabında, hava değişim sayısı, $n_h=0,8$ (h^{-1}) olarak alınmıştır. Binanın aylık ortalama iç kazancı, $\Phi_{i,ay}=5$ W/m^2 olarak alınmıştır. Binanın aylık ortalama güneş enerjisi kazanç hesabında, saydam yüzeylerin aylık ortalama gölgeleme faktörü ($r_{i,ay}$), 0,8 olarak alınmıştır. Ortalama aylık güneş ışınımı şiddeti ($I_{i,ay}$), tüm bölgeler için bina yönlerine göre sabit kabul edilerek TS 825 standardından alınmıştır[12]. Camlar için düzeltme faktörü, $F_w=0,80$ ve laboratuvar şartlarında ölçülen cam yüzeyine dik olarak gelen ışın için güneş enerjisi geçirme faktörü, $g_{\perp}=0,75$ olarak alınmıştır.

2.3. Yıllık Yakıt Maliyeti ve Optimum Yalıtım Kalınlığı Hesaplanması (Calculation of Annual Fuel Cost and Optimum Insulation Thickness)

Isıtma için yıllık yakıt maliyeti C_h aşağıdaki eşitlikle hesaplanır;

$$C_h = \frac{Q_{yıl}}{H_u \times n_k} \times C_f \quad (9)$$

Burada; C_f yakıt birim fiyatı ($\$/m^3$), H_u (kWh/m^3) kullanılan yakıtın alt ısı değeri ve n_k ısıtma sisteminin verimidir. Bu hesaplamalarda kullanılan yakıtın birim fiyatı [14] ve alt ısı değeri [14] Çizelge 3'de verilmiştir.

Optimum yalıtım kalınlığının hesaplanmasında ömür maliyet analizi yöntemi kullanılmıştır. N yıllık bir zaman dilimi boyunca toplam ısıtma maliyeti, bugünkü değer faktörü (PWF) kullanılarak hesaplanmıştır [8]. PWF, enflasyon ve faiz oranlarına göre aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$r = \begin{cases} \frac{(i-g)}{(1+g)}, & \text{eğer } i > g \\ \frac{(g-i)}{(1+i)}, & \text{eğer } g > i \end{cases} \quad (10)$$

$$PWF = \begin{cases} \frac{(1+r)^{N-1}}{r \times (1+r)^N}, & i \neq g \\ \frac{N}{(1+i)}, & i = g \end{cases} \quad (11)$$

Burada; PWF bugünkü değer faktörü, i faiz oranı [15], g enflasyon oranı [16], r gerçek faiz oranı ve N (yıl) ömür maliyet analizi süresidir [5]. PWF hesaplamalarında kullanılan parametreler Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Hesaplamalarda kullanılan parametreler (The parameters used in calculations)

| Parametre | Değer | Birim |
|------------------------------------|--------|---------------|
| Yakıt | | |
| Doğal gaz | | |
| Alt ısı değeri (H_u) [14] | 9,595 | (kWh/m^3) |
| Birim fiyat (C_f) [14] | 0,325 | ($\$/m^3$) |
| Isıtma sistemi verimi (η_k) | %98 | |
| Yalıtım Malzemesi | | |
| Cam yünü (λ) [13] | 0,045 | (W/mK) |
| XPS (λ) [13] | 0,035 | (W/mK) |
| EPS (λ) [13] | 0,035 | (W/mK) |
| Cam yünü birim fiyatı [13] | 32 | ($\$/m^3$) |
| XPS birim fiyatı [13] | 120 | ($\$/m^3$) |
| EPS birim fiyatı [13] | 210 | ($\$/m^3$) |
| PWF | | |
| Faiz oranı (i) [15] | %12,75 | |
| Enflasyon oranı (g) [16] | %10,35 | |
| Ömür Süresi (N) [5] | 30 | (yıl) |
| Pencere [12] | | |
| U_p | 2,4 | (W/m^2K) |
| F_w | 0,8 | |
| g_{\perp} | 0,75 | |
| $r_{i,ay}$ | 0,8 | |
| Aylık iç kazançlar | | |
| $\Phi_{i,ay}$ [12] | 5 | W |
| Hava değişim sayısı | | |
| n_h [12] | 0,8 | (h^{-1}) |
| İç Ortam Sıcaklığı | | |
| θ_i [12] | 19 | $^{\circ}C$ |
| Döviz kuru | | |
| $\$/TL$ [17] | 3,75 | |

Bu çalışmada, üç farklı yalıtım malzemesi kullanılarak bina zarfının optimum yalıtım kalınlıkları hesaplanmıştır. Yalıtım malzemelerinin fiyatları Çizelge 3'te verilmiştir[13]. Yalıtım maliyetinin (C_{ins}) hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır;

$$C_{ins} = C_i \times x \quad (12)$$

Burada; C_i , yalıtım malzemesinin ($\$/m^3$) birim fiyatı ve x ise m cinsinden yalıtım malzemesinin kalınlığıdır. Sonuç olarak, yakıt maliyeti ve yalıtım maliyetinden oluşan toplam maliyet C_T ($\$/m^2$), aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır;

$$C_T = C_h \times PWF + C_{ins} \quad (13)$$

Burada; yıllık ısıtma maliyeti C_h ($\$/m^2$), bugünkü değer faktörü PWF, yalıtım maliyeti C_{ins} ($\$/m^2$) ile ifade edilmiştir.

2.4. Net Kazanç ve Geri Ödeme Süresinin

Hesaplanması (Calculation of Net Saving and Payback Period)

30 yıllık net kazanç (NK); yalıtımsız binanın 30 yıllık toplam maliyetinden yalıtımlı binanın 30 yıllık toplam maliyeti çıkartılarak hesaplanmıştır.

$$NK = C_{To} - C_T \quad (14)$$

Burada; net kazançlar NK (\$/m²), yalıtımsız binanın 30 yıllık toplam maliyeti C_{To} (\$/m²), yalıtımlı binanın 30 yıllık toplam maliyeti C_T (\$/m²) ile ifade edilmiştir.

Gerri ödeme süresi (yıl); yalıtım maliyetinin C_{ins} (\$/m²), yıllık yakıt tasarrufuna bölünmesiyle hesaplanmıştır. Yıllık yakıt tasarrufu, yalıtımsız binanın yıllık yakıt maliyetinden C_{ho} (\$/m²) yalıtımlı binanın yıllık yakıt maliyetinin C_h (\$/m²) çıkartılmasıyla elde edilmiştir. Gerri ödeme süresi aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır;

$$\text{Gerri Ödeme Süresi} = \frac{C_{ins}}{(C_{ho} - C_h)} \quad (15)$$

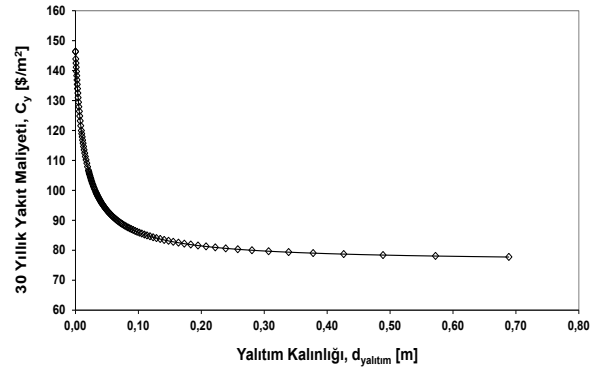
Burada; yalıtım maliyeti C_{ins} (\$/m²), yalıtımsız binanın yıllık yakıt maliyeti C_{ho} (\$/m²), yalıtımlı binanın yıllık yakıt maliyeti C_h (\$/m²) ile ifade edilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS & DISCUSSION)

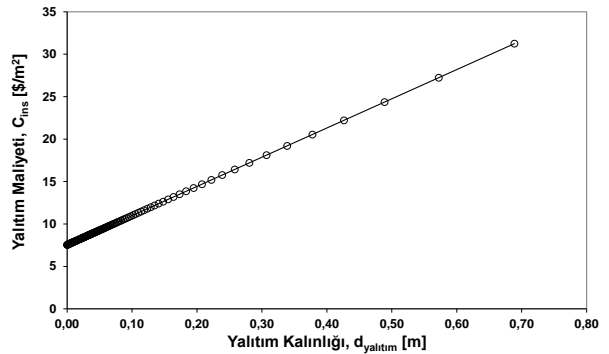
Yalıtım uygulaması, binalarda enerji tasarrufu için etkili yollardan biridir. Bu nedenle, optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi enerji verimliliği için çok önemlidir. Bu çalışmada tavan, taban ve dış duvarlar için optimum yalıtım kalınlıkları ayrı ayrı hesaplanmıştır. XPS, EPS ve cam yünü hesaplamalarda kullanılan yalıtım malzemeleridir. Tavan yalıtımı için cam yünü, taban yalıtımı için XPS ve dış duvar yalıtımı için EPS kullanılmıştır. Türkiye'deki dört farklı DG bölgesi için yapılan çalışmalarda yakıt olarak doğalgaz kullanılmıştır.

Bu çalışmada optimizasyon metodu olarak ömür maliyet analizi metodu kullanılmıştır. Toplam maliyeti temel alan ömür maliyet analizi 30 yıllık bir kullanım ömrü için yapılmıştır. Ömür maliyet analizinde, yalıtım için yapılan maliyet ilk yatırım maliyetidir. Kullanım maliyeti ise 30 yıllık süre boyunca binayı ısıtma için kullanılan yakıt maliyetidir. Toplam maliyet ise yatırım maliyeti ve 30 yıllık yakıt maliyetinin toplamıdır. Yalıtımsız binalar için ilk yatırım maliyeti yoktur. Yalıtımsız binalarda sadece ısıtma için kullanılan 30 yıllık yakıt maliyeti, toplam maliyeti temsil etmektedir.

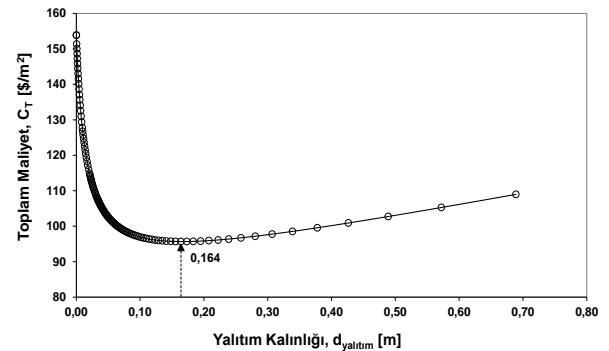
Binalarda yalıtım kalınlığı, bina kabuğunun tasarımında önemli bir parametredir. Düşük yalıtım kalınlığı, ısının daha hızlı aktarılmasına sebep olarak ısı konforu ve enerji tasarrufu üzerinde olumsuz bir etki oluşturur. Binalarda artan yalıtım kalınlığı ile ısı kaybı ve yakıt maliyeti azalır. Ancak yalıtım kalınlığının artması yalıtım maliyetinin artması demektir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, yalıtım kalınlığının artmasıyla, ısıtma için gereken enerji ihtiyacı ve 30 yıllık toplam yakıt maliyeti azalmaktadır. Bununla birlikte, yalıtım kalınlığı arttıkça, yalıtım maliyetinin Şekil 2'de görüldüğü gibi artacağı açıktır.



Şekil 1. Yalıtım kalınlığının 30 yıllık toplam yakıt maliyeti üzerine etkisi. (The effect of insulation thickness on the 30 years heating cost)



Şekil 2. Yalıtım kalınlığının yalıtım maliyeti üzerine etkisi. (The effect of insulation thickness on the insulation cost.)



Şekil 3. Yalıtım kalınlığının 30 yıllık toplam maliyet üzerine etkisi. (The effect of insulation thickness on the total cost.)

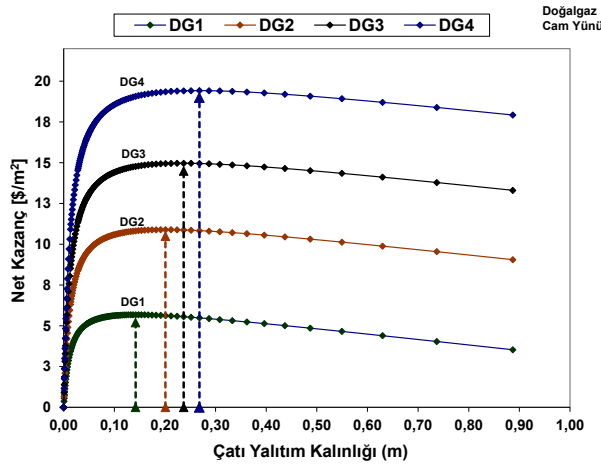
Hesaplamalarda, öncelikle, farklı yalıtım kalınlıklarında binanın ısıtılması için gerekli yıllık enerji ihtiyaçları belirlenmiştir. Daha sonra yalıtım maliyeti ve 30 yıllık yakıt maliyetinden oluşan toplam maliyetler bulunmuştur. Farklı yalıtım kalınlıklarına karşılık gelen toplam maliyet; yalıtım kalınlığının artmasıyla belirli bir noktaya kadar azalmakta daha sonra Şekil 3'de görüldüğü gibi tekrar artmaya başlamaktadır. Toplam maliyetin minimum olduğu bu noktaya karşılık gelen

yalıtım kalınlığı, optimum yalıtım kalınlığı olarak ifade edilmektedir.

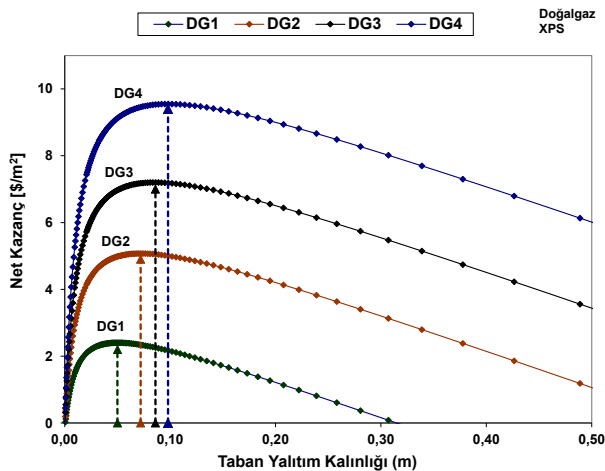
Optimum yalıtım kalınlıkları belirlendikten sonra, optimum yalıtım kalınlıklarına karşılık gelen ısı geçirgenlik katsayıları (U-değerleri) hesaplanarak her bir DG bölgesinde tavan, taban ve dış duvar için optimum U-değerleri belirlenmiştir.

Yalıtımsız binanın 30 yıllık toplam maliyetinden, yalıtımlı binanın 30 yıllık toplam maliyeti çıkartılarak 30 yıllık net kazançlar belirlenmiştir. Toplam maliyet grafiklerinde toplam maliyetin minimum olduğu nokta optimum yalıtım kalınlığını verirken net kazanç grafiklerinde net kazancın maksimum olduğu nokta optimum yalıtım kalınlığına karşılık gelmektedir.

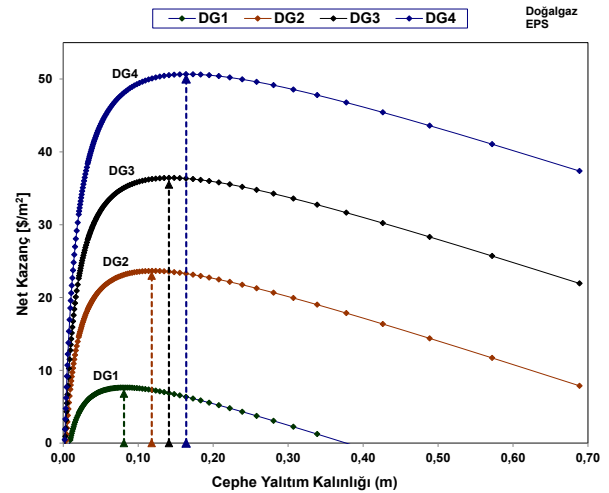
DG bölgelerine göre net kazançlar, tavan, taban ve dış duvarlar için Şekil 4-6'da verilmiştir. Net kazanç, optimum yalıtım kalınlığında maksimum değerine ulaşır. Başka bir deyişle 30 yıllık net kazancın maksimum olduğu nokta, ömür maliyet analizine göre optimum yalıtım kalınlığını belirleyen noktadır.



Şekil 4. DG bölgelerine göre çatı yalıtım kalınlığının net kazanç üzerine etkisi. (The effect of insulation thickness on the net savings for ceiling in DG regions.)



Şekil 5. DG bölgelerine göre taban yalıtım kalınlığının net kazanç üzerine etkisi. (The effect of insulation thickness on the net savings for floor in DG regions.)



Şekil 6. DG bölgelerine göre dış duvar yalıtım kalınlığının net kazanç üzerine etkisi. (The effect of insulation thickness on the net savings for wall in DG regions.)

Şekil 4-6'dan görüldüğü üzere, bina zarf bileşenlerinin optimum yalıtım kalınlıkları bölgelere göre farklı değerler almaktadır. DG4 bölgesinde tavan için optimum yalıtım kalınlığı 26,8 cm olurken DG1 bölgesinde zemin için sadece 5,0 cm'dir. DG4 bölgesinde dış duvar için net kazanç 50,66 \$/m² iken, zemin için DG1 bölgesinde sadece 2,40 \$/m²'dir.

Net kazançlar, bölgenin iklim koşulları ile doğru orantılıdır. Şekil 4-6'dan görüldüğü üzere sıcak iklim bölgesine sahip DG1 bölgesinden daha soğuk bir iklime sahip DG4 bölgesine gidildikçe net kazançlar ve optimum yalıtım kalınlıkları artmaktadır. Daha soğuk bir iklime sahip DG4 bölgesinde ısıtma için kullanılan enerjinin daha fazla olması net kazançları artırmaktadır. Soğuk iklime sahip bölgelerde ısı yalıtımı yapılması sıcak iklime sahip bölgelerden daha gereklidir. Isıtma için gerekli enerji ihtiyacının artması daha kalın yalıtım malzemelerinin kullanılmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda yakıt maliyetinin artması optimum yalıtım kalınlığını artırmaktadır.

Şekil 4-6'dan görüldüğü üzere en büyük net kazançlar dış duvarların yalıtılması durumunda elde edilmiştir. Dış duvar yalıtımından elde edilen kazançlar DG bölgelerine göre 8,12 ile 50,66 \$/m² arasında değişirken bu değerlerin DG bölgelerine göre tavan için 5,68 ile 19,42 \$/m², taban için 2,40 ile 9,55 \$/m² arasında değiştiği belirlenmiştir. Buda göstermektedir ki; en büyük ısı kayıplarının gerçekleştiği dış duvarların yalıtılması, tavan ve tabana göre enerji tasarrufu bakımından daha büyük öneme sahiptir.

DG1, DG2, DG3, DG4 bölgelerinde cephe için optimum yalıtım kalınlıkları sırasıyla 0,081 m, 0,118 m, 0,141 m ve 0,164 m olarak hesaplanmıştır. Optimum yalıtım kalınlıkları ve optimum yalıtım kalınlıklarına karşılık gelen optimum ısı geçirgenlik katsayıları (U-değerleri) farklı bölgeler için Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. DG Bölgelerine göre optimum yalıtım kalınlıkları ve U-değerleri. (The optimum insulation thicknesses and the U-values for the regions.)

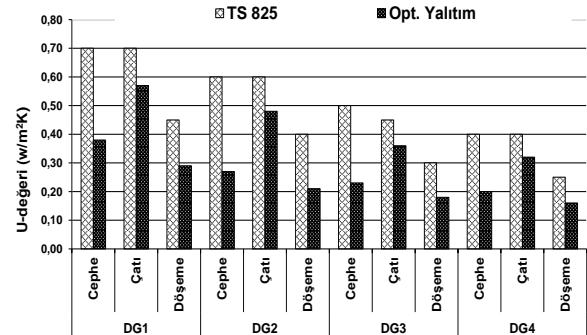
| DG | Dış duvar için optimum yalıtım kalınlığı (m) | U_D (W/m ² K) | Tavan için optimum yalıtım kalınlığı (m) | U_T (W/m ² K) | Taban için optimum yalıtım kalınlığı (m) | U_t (W/m ² K) |
|-----|--|----------------------------|--|----------------------------|--|----------------------------|
| DG1 | 0,081 | 0,38 | 0,142 | 0,29 | 0,050 | 0,57 |
| DG2 | 0,118 | 0,27 | 0,201 | 0,21 | 0,072 | 0,42 |
| DG3 | 0,141 | 0,23 | 0,237 | 0,18 | 0,086 | 0,36 |
| DG4 | 0,164 | 0,20 | 0,268 | 0,16 | 0,098 | 0,32 |

Çizelge 5’de, bu çalışmada hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları ve karşılık gelen U-değerleri TS 825 limit değerleri ile karşılaştırılmıştır. DG1 bölgesindeki cephe için hesaplanan optimum yalıtım kalınlığı 0,081 m iken bu değer TS 825 standardında 0,040 m’dir. Optimum yalıtım kalınlıkları ile TS 825 standardında belirtilen limit yalıtım kalınlıkları arasındaki en büyük fark, dış duvar için hesaplanan değerlerde oluşurken, en küçük farkın taban için hesaplanan değerlerde olduğu belirlenmiştir.

DG1 bölgesinde optimum yalıtım kalınlığına göre yalıtım yapılması durumunda, dış duvar, tavan ve taban için yalıtım kalınlığının TS 825 standardına göre sırasıyla %103, % 60 ve % 25 oranında artırılması gerekmektedir. Yalıtım kalınlığında en büyük artışın dış duvarlarda olmasının iki nedeni vardır. Bunlardan birincisi; dış duvar alanının (1392 m²) taban (300 m²) ve tavan (300 m²) alanından daha büyük olması ve buna bağlı olarak dış duvarlardan olan ısı kaybının daha yüksek olmasıdır. İkinci sebep ise TS 825 standardında dış duvar için izin verilen limit U_{cephe} değerlerinin yüksek olması sonucu, TS 825 standardının daha ince yalıtıma izin vermesidir. Aynı yüzey alanına sahip taban (300 m²) ve tavanda (300 m²) oluşan farkın nedeni ise ısı kayıpları hesaplanırken TS 825 standardının tavadan olan ısı kayıplarını 0,8 katsayı, tabandan olan ısı kayıplarını ise 0,5 katsayısı ile azaltmasıdır. Isı kayıplarının azalması optimum yalıtım kalınlığını azaltmaktadır. Ayrıca hesaplamalarda

kullanılan XPS fiyatının cam yünü fiyatından 3,75 kat daha pahalı olması XPS ile yapılan yalıtımın maliyetini artırmaktadır. Yalıtım maliyetinin artması optimum yalıtım kalınlığını azaltmaktadır.

Tavan, taban ve dış duvarlar için hesaplanan optimum değerler ile TS 825’te tanımlanan limit değerler Çizelge 5’de ve Şekil 8’de karşılaştırılmıştır. Çizelge 5’de görüldüğü üzere, hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları, tüm bölgelerde, TS 825 standardında belirtilen limit U-değerlerine karşılık gelen yalıtım kalınlıklarından daha büyüktür.

**Şekil 7.** Optimum U-değerlerinin TS 825 limit değerleri ile karşılaştırılması. (Comparison of optimum U-values with TS 825 limit values.)**Çizelge 5.** Optimum yalıtım kalınlıkları ve U-değerlerinin TS 825 limit değerleri ile karşılaştırılması. (Comparison of optimum insulation thicknesses and U-values with TS 825 limit values.)

| DG | Yalıtım | U_D (W/m ² K) | Dış duvar için optimum yalıtım kalınlığı (m) | U_T (W/m ² K) | Tavan için optimum yalıtım kalınlığı (m) | U_t (W/m ² K) | Taban için optimum yalıtım kalınlığı (m) |
|-----|---------|----------------------------|--|----------------------------|--|----------------------------|--|
| DG1 | TS 825 | 0,70 | 0,040 | 0,45 | 0,089 | 0,70 | 0,040 |
| | Optimum | 0,38 | 0,081 | 0,29 | 0,142 | 0,57 | 0,050 |
| DG2 | TS 825 | 0,60 | 0,048 | 0,40 | 0,102 | 0,60 | 0,048 |
| | Optimum | 0,27 | 0,118 | 0,21 | 0,201 | 0,42 | 0,072 |
| DG3 | TS 825 | 0,50 | 0,060 | 0,30 | 0,142 | 0,45 | 0,068 |
| | Optimum | 0,23 | 0,141 | 0,18 | 0,237 | 0,36 | 0,086 |
| DG4 | TS 825 | 0,40 | 0,079 | 0,25 | 0,175 | 0,40 | 0,079 |
| | Optimum | 0,20 | 0,164 | 0,16 | 0,268 | 0,32 | 0,098 |

Sonuçlar göstermektedir ki; dış duvar yalıtımında EPS kullanılması durumunda optimum yalıtım kalınlığı 8,1 (DG1) ile 16,4 cm (DG4) arasında, tavan yalıtımında cam yünü kullanılması durumunda optimum yalıtım kalınlığı 14,2 (DG1) ve 26,8 cm (DG4) arasında, taban yalıtımında XPS kullanılması durumunda optimum yalıtım kalınlığı 5,0 (DG1) ile 9,8 cm (DG4) arasında değişmektedir.

Çizelge 6'da, optimum yalıtım kalınlığına karşılık gelen yıllık enerji ihtiyacı, yakıt tasarrufu, net kazanç ve geri ödeme sürelerinin TS 825 limit değerleri ile karşılaştırılması sunulmuştur. Çizelge 6'da görüldüğü üzere, yalıtım malzemesi ve iklim bölgesine bağlı olarak yakıt tasarrufu 26,32 ile 92,59 \$/m² arasında değişirken, geri ödeme süresi 10,2 ile 3,6 yıl arasında değişmektedir.

TS 825 standardında belirtilen limit değerleri yerine optimum yalıtım kalınlığı ile yalıtım yapılması durumunda DG1, DG2, DG3 ve DG4 bölgelerinde yıllık enerji ihtiyacının sırasıyla %18,1, %17,1, %13,3 ve %10,1 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Yıllık enerji ihtiyacı, yakıt tasarrufu ve net kazançlar soğuk iklime sahip bölgelere gidildikçe artmakta, geri ödeme süresi ise azalmaktadır.

Enerji tasarrufu arttıkça geri ödeme süreleri kısalmaktadır. En düşük geri ödeme süresi soğuk iklime sahip DG4 bölgesinde 3,6 yıl olarak hesaplanmıştır. DG4 bölgesinde TS 825'de sunulan U-değerlerine karşılık gelen geri ödeme süresi 3 yıl olarak hesaplanmıştır. Geri ödeme süreleri karşılaştırıldığında, geri ödeme süresindeki 6 aylık artışa karşılık yıllık yakıt tasarrufunda %8 artış sağlandığı hesaplanmıştır. Dolayısıyla, soğuk iklim bölgelerinde optimum yalıtım kalınlığının artması sonucu yalıtım maliyeti yükselmekte ve geri ödeme süreleri kısalmaktadır.

Çizelge 5 incelendiğinde, bina zarfının, tavanda en yüksek, tabanda ise en düşük yalıtım kalınlığına ihtiyaç duyduğu anlaşılmaktadır. Çizelge 6'ya göre, sıcak iklime sahip DG1 bölgesinden soğuk iklime sahip DG4 bölgesine gidildikçe yıllık enerji ihtiyacı, yakıt tasarrufu ve net kazancın arttığı görülmektedir. Soğuk iklim bölgelerinde metrekare başına yakıt tasarrufunun daha

yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin DG4 bölgesinde metrekare başına yakıt tasarrufu DG1 bölgesinden 3,5 kat daha fazladır.

Optimum yalıtım kalınlığı ile TS 825 standardı karşılaştırıldığında; DG1 bölgesinde optimum yalıtım kalınlığı ile TS 825 standardına göre 30 yılda 3,17 \$/m² daha fazla yakıt tasarrufu ve 0,7 \$/m² daha fazla net kazanç elde edilebileceği hesaplanmıştır. Ülkemizdeki toplam bina stokunun yaklaşık 2.400.000.000 m² olduğu tahmin edilmektedir[18]. Optimum yalıtım kalınlıklarının kullanılması sonucu elde edilecek tasarrufun mertebesini belirlemek için, Türkiye'deki tüm binaların DG1 bölgesinde yer aldığı varsayılmış ve TS 825 standardına göre 3,17 \$/m² daha fazla yakıt tasarrufu ile 30 yıllık bir sürede 7.608.000.000 \$ yakıt tasarrufu sağlanabileceği hesaplanmıştır. Bu yakıt tasarrufu miktarının soğuk bölgelere gidildikçe artacağı aşikardır. Tüm binaların DG4 bölgesinde bulunduğunu varsayarsak, 30 yılda 16.872.000.000 \$ yakıt tasarrufu sağlanabilecektir. Bina stokunun DG bölgelerine eşit olarak dağıtılması durumunda ise yaklaşık 13.224.000.000 \$ yakıt tasarrufu sağlanabileceği hesaplanmıştır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Binaların ısıl konforu için gerekli olan enerji, Türkiye konut sektörünün toplam enerji tüketiminin % 65'ine karşılık gelmektedir [1]. Dolayısıyla, ısı yalıtımı, binalarda kullanılan enerji miktarını azaltmak için alınabilecek en etkili önlemlerden biridir. Yalıtım malzemeleri enerji verimli binalar için vazgeçilmez olmakla birlikte, yalıtım kalınlığı için optimum çözümün önemli olduğu anlaşılmıştır.

Bu çalışmada, tavan, taban ve dış duvarların optimum yalıtım kalınlıkları, yakıt tasarrufu, net kazanç ve geri ödeme süreleri, Türkiye'nin dört farklı DG bölgesi için 30 yıllık ömür maliyet analizi yapılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar, TS 825 standardında belirtilen farklı DG bölgeleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Hesaplamalarda, üç farklı yalıtım malzemesi ve bir yakıt türü kullanılmıştır.

Çizelge 6. Optimum yalıtım kalınlığına karşılık gelen yıllık enerji ihtiyacı, yakıt tasarrufu, net kazanç ve geri ödeme sürelerinin TS 825 limit değerleri ile karşılaştırılması. (Comparison of the annual energy requirement, fuel saving, net saving and payback periods corresponding to the optimum insulation thickness with the TS 825 limit values.)

| DG | Yıllık Enerji İhtiyacı (kWh/m ²) | | Yakıt Tasarrufu (\$/m ²) | | Net Kazanç (\$/m ²) | | Geri Ödeme Süresi (Yıl) | |
|-----|--|--------|--------------------------------------|--------|---------------------------------|--------|-------------------------|--------|
| | Optimum Yalıtım | TS 825 | Optimum Yalıtım | TS 825 | Optimum Yalıtım | TS 825 | Optimum Yalıtım | TS 825 |
| DG1 | 18,49 | 22,79 | 26,32 | 23,15 | 14,02 | 13,32 | 10,2 | 9,3 |
| DG2 | 37,83 | 45,60 | 50,98 | 45,23 | 37,50 | 34,96 | 5,8 | 5,0 |
| DG3 | 53,36 | 61,58 | 70,54 | 64,45 | 56,19 | 53,40 | 4,4 | 3,7 |
| DG4 | 72,48 | 80,62 | 92,59 | 85,56 | 77,20 | 74,66 | 3,6 | 3,0 |

Sonuçlar bölgeye, yalıtım malzemesine ve bina zarfına bağlı olarak; optimum yalıtım kalınlığının 5,0 cm ile 26,8 cm arasında değiştiğini, yakıt tasarrufunun 26,32 \$/m² ile 92,59 \$/m² arasında değiştiğini ve geri ödeme sürelerinin 10,2 ile 3,6 yıl arasında değiştiğini göstermektedir. Sıcak iklim bölgesinden soğuk iklim bölgesine gidildikçe optimum yalıtım kalınlığı, yakıt tasarrufu ve net kazançlar artarken, geri ödeme süreleri azalmaktadır. Soğuk iklim bölgelerinde enerji tasarrufu sıcak bölgelere göre daha fazla olmaktadır. Özellikle soğuk iklim bölgelerinde, ısı yalıtımı, ilk yatırım maliyetini diğer bölgelere göre daha kısa sürede amorti etmektedir.

Bu çalışmada hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları ile TS 825 standardında belirtilen sınır değerler arasında büyük fark vardır. TS 825 standardında verilen limit yalıtım kalınlıkları bu çalışmada hesaplanan optimum yalıtım kalınlıklarından daha küçüktür. Sonuç olarak, bu çalışmada hesaplanan optimum yalıtım kalınlıklarına karşılık gelen optimum U-değerleri, TS 825 standardında belirtilen limit U-değerlerinden daha küçüktür. Bu nedenle TS 825 standardında belirtilen limit U-değerlerinin yeterli olmadığı ve azaltılması gerektiği değerlendirilmektedir. TS 825 standardında belirtilen limit U-değerlerinin azaltılması durumunda yakıt tüketiminin azaltılacağı ve enerjinin daha verimli kullanılacağı açıktır.

Sonuç olarak, konut tipi binalarda enerjiyi etkin bir şekilde kullanmanın ilk yolu ısıtma yükünü azaltmaktır. Isıtma yüklerini azaltmak için en ekonomik ve kullanışlı yöntem ısı yalıtımıdır. Isı yalıtımıyla enerji kaynaklarını korumak, enerji ihtiyacını azaltmak ve çevreyi korumak mümkündür. Küresel ısınma, fosil yakıtların hızla tükenmesi, artan enerji ihtiyacı ve enerji fiyatları, önümüzdeki yıllarda ısı yalıtımını daha da önemli hale getirecektir.

SİMGE VE KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

| | |
|-------------------|---|
| A/V | : Isı kaybeden toplam alan/Brüt hacim |
| U-değeri | : Isıl geçirgenlik katsayısı |
| Q _{yıl} | : Yıllık enerji ihtiyacı, (kWh/m ²) |
| Q _{ay} | : Aylık enerji ihtiyacı, (kWh/m ²) |
| H | : Binanın özgül ısı kaybı, (W/K) |
| H _v | : Havalandırma yoluyla ısı kaybı, (W/K) |
| H _T | : İletim ve taşınım ile ısı kaybı, (W/K) |
| θ _i | : Aylık ortalama iç ortam sıcaklığı, (°C) |
| θ _e | : Aylık ortalama dış ortam sıcaklığı, (°C) |
| η _{ay} | : Kazançların aylık ortalama kullanım faktörü |
| Φ _{i,ay} | : Aylık ortalama iç ısı kazancı, (W) |
| Φ _{s,ay} | : Aylık ortalama güneş enerjisi kazancı, (W) |
| U _D | : Dış duvarın ısı geçirgenlik katsayısı, (W/m ² K) |
| U _P | : Pencerenin ısı geçirgenlik katsayısı, (W/m ² K) |
| U _T | : Tavanın ısı geçirgenlik katsayısı, (W/m ² K) |
| U _t | : Tabanın ısı geçirgenlik katsayısı, (W/m ² K) |

| | |
|-------------------|--|
| A _D | : Dış duvar alanı, (m ²) |
| A _P | : Pencere alanı, (m ²) |
| A _T | : Tavan alanı, (m ²) |
| A _t | : Taban alanı, (m ²) |
| R _i | : İç yüzey ısı iletim direnci, (m ² K/W) |
| R | : Toplam ısı geçirgenlik direnci, (m ² K/W) |
| R _e | : Dış yüzey ısı iletim direnci katsayısı (m ² K/W) |
| d | : Yapı bileşeninin kalınlığı (m) |
| x | : Yalıtım malzemesi kalınlığı (m) |
| n _h | : Hava değişim oranı (h ⁻¹) |
| V _{brüt} | : Binanın ısıtılan brüt hacmi (m ³) |
| V _h | : Havalandırılan hacim (m ³) |
| A _n | : Bina kullanım alanı (m ²) |
| ρ | : Yoğunluk (kg/m ³) |
| λ | : Isı iletim katsayısı, (W/mK) |
| c | : Havanın özgül ısı (J/kgK) |
| r _{i,ay} | : i yönünde saydam yüzeylerin aylık ortalama gölgelenme faktörü |
| g _{i,ay} | : i yönündeki saydam elemanların güneş enerjisi geçirme faktörü |
| I _{i,ay} | : i yönünde dik yüzeylere gelen aylık ortalama güneş ışınımı şiddeti (W/m ²) |
| A _i | : i yönündeki toplam pencere alanı (m ²) |
| F _w | : Camlar için düzeltme faktörü |
| g _± | : Yüzeye dik gelen ışın için güneş enerjisi geçirme faktörü |
| KKO _{ay} | : Kazanç/kayıp oranı |
| H _u | : Yakıtın alt ısı değeri |
| η _k | : Isıtma sistemi verimi |
| C | : Maliyet |
| C _{ins} | : Yalıtım maliyeti (\$/m ³) |
| C _h | : Yalıtımlı binanın yıllık yakıt maliyeti (\$/m ²) |
| C _{ho} | : Yalıtımsız binanın yıllık yakıt maliyeti (\$/m ²) |
| C _f | : Yakıt birim fiyatı (\$/m ³) |
| C _i | : Yalıtım malzemesinin birim fiyatı (\$/m ³) |
| C _T | : 30 yıllık toplam maliyet (\$/m ²) |
| PWF | : Bugünkü Değer Faktörü |
| i | : Faiz oranı |
| g | : Enflasyon oranı |
| r | : Gerçek faiz oranı |
| N | : Ömür maliyet süresi (yıl) |

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yaman, Ö., Şengül, Ö., Selçuk, H., Çalikuş, O., Kara, İ., Erdem, Ş. and Özgür, D., "Binalarda ısı yalıtımı ve ısı yalıtım malzemeleri", *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 487: 62-75, (2015).
- [2] ÇŞB, "Isı yalıtım uygulama kılavuzu", Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2-3, (2015).

- [3] Ekici, B., "TS 825 Binalarda ısı yalıtım kuralları standardının güneş ışınımı açısından değerlendirilmesi", *Megaron*, 10(1): 14-24, (2015).
- [4] EU (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). European Parliament and the Council of the European Union, 2010. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=en>.
- [5] EC (2012b). Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements. European Commission, 2012. Available: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012XC0419\(02\)&from=EN](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012XC0419(02)&from=EN)
- [6] Hasan, A., "Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost", *Applied Energy*, 63(2): 115-124, (1999).
- [7] Comakli, K. and Yuksel, B., "Optimum insulation thickness of external walls for energy saving", *Applied Thermal Engineering*, 23(4): 473-479, (2003).
- [8] Özel, M., "Bina dış duvarlarının optimum yalıtım kalınlıkları için dinamik yaklaşım ve maliyet analizi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(4): 879-884, (2008).
- [9] İnallı, M., Balo, F. and Uçar, A., "Yapıların dış duvarlarında optimum yalıtım kalınlığının üç farklı metotla tespiti", *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 125: 5-14, (2011).
- [10] Dikmen, N., "1995 Depremi sonrası Dinar'da kurulmuş olan afet konutlarının TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları'na uygunluğu açısından incelenmesi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 2(2): 50-59, (2010).
- [11] Kürekçi, N. A., "Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Turkey's provincial centers", *Energy and Buildings*, 118: 197-213, (2016).
- [12] TS 825, "Binalarda Isı Yalıtım Kuralları", *Türk Standartları Enstitüsü*, 1-75, (2008).
- [13] İnternet: İZODER. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.izoder.org.tr%2F+&date=2018-10-31>, Son Erişim Tarihi: 20.02.2018.
- [14] İnternet: BOTAS. (2018). *Tarife*. URL: <http://www.botas.gov.tr/index/tur/faaliyetler/dogalgaz/tarifeSerTukV8.asp>. [Erişim Tarihi: 20 Şubat 2018].
- [15] İnternet: TCMB. (2018). *TCMB Faiz Oranları (%) Geçirgenlik Penceresi (LON)*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tcmb.gov.tr%2Fwps%2Fwcm%2Fconnect%2FT%2FTCM%2BTR%2FMain%2BMenu%2FTemel%2B Faaliyetler%2FPara%2BPolitikasi%2FMerkez%2B Bankasi%2BFaiz%2BOranlari%2FGec%2BLikidite%2BP enceresi%2B%2528LON%2529&date=2018-10-31>, Son Erişim Tarihi: 20.02.2018.
- [16] İnternet: TÜİK. (2018). *Tüketici Fiyat Endeksi, Ocak 2018*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tuik.gov.tr%2FPreHaberBultenleri.do%3Fid%3D27758&date=2018-10-31>, Son Erişim Tarihi: 20.02.2018.
- [17] İnternet: TCMB. (2018). *20.02.2018 Günü Saat 15:30'da Belirlenen Göstergeler Niteliğindeki Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası Kurları*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tcmb.gov.tr%2Fkurlar%2F201802%2F20022018.xml&date=2018-10-31>, Son Erişim Tarihi: 20.02.2018.
- [18] Schimschar, S., Boermans, T., Kretschmer, D., Offermann, M. and Ashok, J., "U-value maps Turkey (Final Report)", *ECOFYS*, Project number: BUIDE 15722, (2016).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN:1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Çoklu robotlarda işbirlikli davranışların karşılaştırılması ve bulanık mantık yaklaşımı

Comparison of cooperative behaviors in multiple robots and fuzzy logic approach

Yazar(lar) (Author(s)): Ahmet Çağdaş SEÇKİN¹, Ahmet ÖZEK², Ceyhun KARPUZ³

ORCID¹: 0000-0002-9849-3338

ORCID²: 0000-0002-0939-3547

ORCID³: 0000-0002-3752-4727

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(Tocitetothisarticle): Seçkin A.Ç., Özek A. ve Karpuz C., “Çoklu robotlarda işbirlikli davranışların karşılaştırılması ve bulanık mantık yaklaşımı”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 913-919, (2019).

Erişim linki(To link to this article):<http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.481177

Çoklu Robotlarda İşbirlikli Davranışların Karşılaştırılması ve Bulanık Mantık Yaklaşımı

Araştırma Makalesi / Research Article

Ahmet Çağdaş SEÇKİN^{1*}, Ahmet ÖZEK², Ceyhan KARPUZ²

¹Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Uşak Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received: 02.10.2016; Kabul/Accepted: 26.08.2017)

ÖZ

Günümüzde pek çok karmaşık görev için donanım ve çalışma hızı açısından hantal ve maliyetli robotik sistemler kullanılmaktadır. Pahalı ve hantal bir robot yerine daha küçük ve basit robotlardan oluşan sistemlerle aynı karmaşık görevleri yerine getirme konusunda yapılan çalışmalar çoklu robotiği ortaya çıkarmıştır. Çoklu ajanlardan oluşan sürülerin hareketi için ilk çözüm modeli Reynolds tarafından hazırlanan Boids algoritmasıdır. Boids algoritması birleşme (cohesion), ayrılma (dispersion) ve hizalanma (align) kurallarının oluşturduğu vektörlerin her ajan için birleştirilip her ajana ayrı uygulanması olarak tanımlanmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada bulanık-işbirlikli bir algoritma tasarlanarak hem akın hem de düzen alma davranışlarının gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Amaç doğrultusunda birden fazla robotun bireysel, işbirlikli ve bulanık-işbirlikli halde akın etmesi ve düzen alması incelenmiş ve türetilen bulanık-işbirlikli algoritmanın başarımı sınanmıştır. Çalışmada sırasıyla, benzetim ortamında kullanılan robot ve görev algoritmaları sunulmuş olup ardından benzetim sonuçları verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre tasarlanan Bulanık akın algoritması, Boids algoritmasından daha kısa görev tamamlama süresi ve daha az haberleşme tekrarı sağladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çoklu robotik, boids algoritması, akın davranışı, bulanık mantık.

Comparison of Cooperative Behaviors in Multiple Robots and Fuzzy Logic Approach

ABSTRACT

Today, cumbersome and costly robotic systems are used for many complex tasks in terms of hardware and operating speed. Instead, the work on performing the same complex tasks as the systems consisting of smaller and simpler robots reveals the multiple robotics, a sub-branch of robotics. The first solution model for the multiple agents flocking behaviors is the Boids algorithm prepared by Reynolds. The Boids algorithm is defined as the combination of cohesion, dispersion and align rules for each agent and application for individuals. Unlike other studies, a fuzzy-collaborative algorithm was designed in this study and it was aimed to perform both flock and formation behaviors. Within the scope of the aim; individual, cooperative and fuzzy-collaborative flocking and formation of multiple robots were examined and the performance of the fuzzy-cooperative algorithm was tested. In the study, robot and task algorithms used in simulation environment are presented and simulation results are given. According to the findings, the fuzzy flocking algorithm is faster and requires less communication cycle than the Boids algorithm.

Keywords: Multiple robotics, boids algorithm, flocking behavior, fuzzy logic.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde robotlar savunma, üretim ve sağlık gibi uygulama alanlarında aktif olarak çalışmaktadır. Gerçek hayatta robotların karşılaştığı fiziksel koşullar, robotları karmaşık ve hantal hale getirebilmektedir. Bu nedenle, performans ve güvenilirlik azalmakta riskler ve maliyetler ise artmaktadır [1], [2]. Bilim insanları, bu sorunu çözmek için karmaşık ve hantal robotların yerini doldurabilecek daha küçük ve basit robotlardan oluşan sistemlerde çalışmaya başlamıştır. Böylece günümüzde robotikte önemli bir yeri olan çoklu robotik kavramı ortaya çıkmıştır. Çoklu robot sistemlerinde canlı sürülerinin davranışlarından esinlenerek yiyecek arama

(foraging), kapsama(covorage), akın etme (flocking), düzen alma (formation), nesnelere etki etme, çoklu hedef gözleme, sürü trafiği ve yol planlama gibi pek çok davranış modellenmiştir [2]–[4].

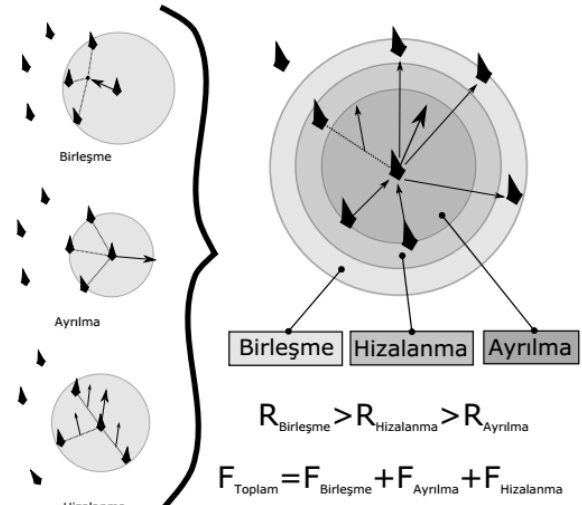
Düzen alma, robotların, o anki bağlı konumlarına göre farklı geometrik şekillerde veya desenlerde dağılımları veya şekli koruyarak hareket etmeleridir. Düzen alma davranışında anahtar problem yerel kontrol kurallarının belirlenmesi, yol planlama, hedef konumlandırma ve birey konumlandırması [5]–[7]. Tüm kurallar ve yol planlama düzen alma için geçerli olan desene bağlıdır. Desenlerin hareket esnasında kullanılması, denklemleri bilinen basit geometrik şekiller için sıkıntı değildir. Fakat bu desenler karmaşıklıklaştıkça homografi tekniği ile desenin döndürülmesi, büyütülüp küçültülmesi veya çarpıtılması mümkün olmaktadır [8], [9].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : cagdash@pau.edu.tr

Akın etme robotların belirli kurallar çerçevesinde belirli bir yönde birlikte hareket etmesi olarak tanımlanmaktadır [10]. Çoklu ajanlardan oluşan sürülerin hareketi için ilk çözüm algoritması Reynolds tarafından hazırlanan boids algoritmasıdır. Boids algoritması Şekil 1'de gösterilmiş olup birleşme (cohesion), ayrılma (dispersion) ve hizalanma (align) kurallarının oluşturduğu vektörlerin toplanmasıyla elde edilmiş bir algoritmadır [11], [12]. Şekilde görülen R harfi ile tanımlı bölgelerin yarı çapları tanımlanmıştır buna göre $R_{\text{Birleşme}} > R_{\text{Hizalanma}} > R_{\text{Ayrılma}}$ şeklindedir. Fakat bu yarıçap değerleri algılayıcı kapasitesine bağlı olarak uygulamada kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Birleşme kuralı, birleşme alanı içinde algılanan komşuların konumlarına göre merkezlerine doğru hareketi sağlayacak bir çekme kuvvet vektörüdür. Bu kural sürüye dâhil olma veya yaklaşma için kullanılmaktadır. Ayrılma kuralı, ayrılma için tanımlanmış bölgede algılanan komşu bireylerden uzaklaşma amacıyla oluşturulan itme kuvvet vektörüdür. Hizalanma kuralı ise birleşme ve ayrılma bölgeleri arasında tanımlı olan bir alanda sürünün aynı yönde veya aynı hedefe doğru hareket etmesi için komşuların hız vektörüne uyum sağlaması için oluşturulan bir kuvvet vektörüdür. Ayrılma, birleşme ve hizalanma bölgeleri robotun algılama, hareket ve sürü içi sıklık gibi parametrelere bağlı olup özelleştirilebilir. Tüm bu kuvvetlerin vektör toplamı sayesinde Boids algoritması olarak bilinen sürü halinde hareket eylemi gerçekleştirilebilmektedir. Boids algoritması öncelikle bilgisayar oyunlarında, animasyonlarda ve benzetimlerde kullanılmıştır. Daha sonra robotik alanının çoklu robot kısmında kullanılmıştır [13], [14]. Akın etme algoritmasında tanımlı Boids bölgeleri kesin sınırlardan oluşmaktadır. Boids bölge sınırları robotların hareket yeteneği, sensörlerin algılama mesafesi, kullanıcının istediği sıklık, haberleşme kapsama alanı vb. parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bu bölgelerin kesin çizgiler halinde uygulanması robotlara çok ani kuvvetler uygulanmasına sebep olabilmektedir. Bu durum da özellikle hızlı hareket eden uçan robotlar gibi sistemler olumsuz etkilenebilmektedir. Günümüzde denetim [15], [16], biyomedikal uygulamalar [17], insan bilgisayar etkileşimi [18] vb. pek çok çalışmada benzer problemler görülmüş ve sistemin karar mekanizmasını doğal hale getirmek amacıyla bulanık mantık çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalardan Boids algoritmasını daha iyi hale getirmek için de türetilmiştir [19]–[22].

Bu çalışmada, diğer çalışmalardan farklı olarak bulanık-ışbirlikli bir algoritma üretilerek hem akın hem de düzen alma davranışlarının gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Amaç doğrultusunda birden fazla robotun bireysel, işbirlikli ve bulanık-ışbirlikli halde akın etmesi ve düzen alması incelenmiş ve türetilen bulanık-ışbirlikli algoritmanın başarımı sınanmıştır. Sınama işlemi için benzetim hazırlanmış olup bu benzetimde robotların bireysel ve kolektif davranışları yarışmacı ve önceden tanımlı olma parametreleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada sırasıyla, benzetim ortamında kullanılan robot ve görev

algoritmaları sunulmuş olup ardından benzetim sonuçları verilmiştir.



Şekil Error! No text of specified style in document.. Boids Algoritması ve Bölgeleri (Boids Algorithm and Areas)

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

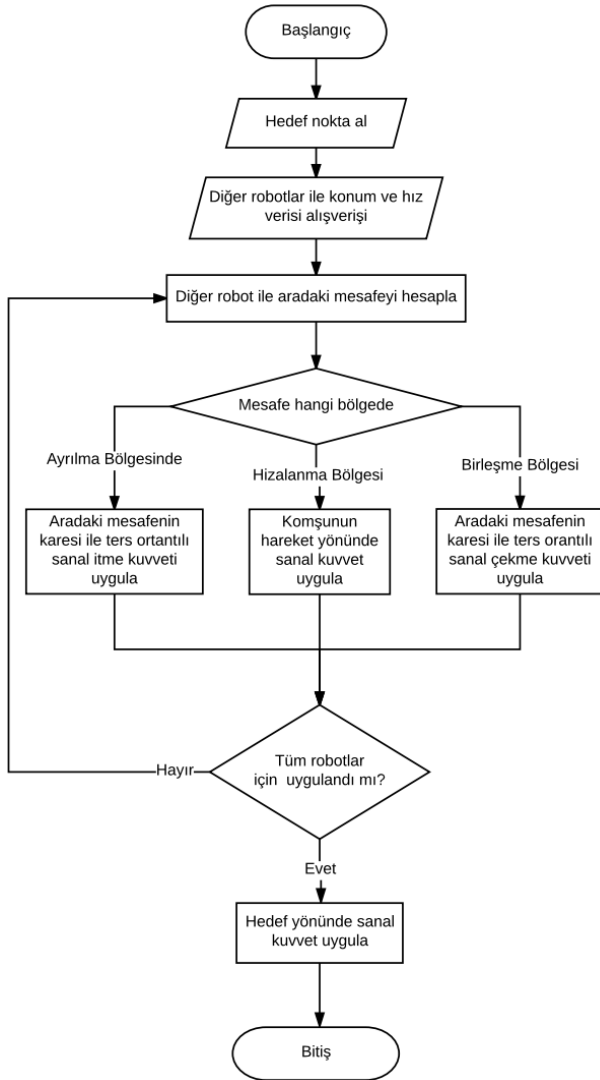
Robotların akın etme denetiminde Reynolds tarafından belirlenmiş Boids algoritmasından faydalanılarak Şekil 2'deki akın denetimi algoritması türetilmiştir. Bu algoritmadaki Boids sanal kuvvetleri kütle çekim veya coulomb yasasında olduğu gibi uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak değişecek şekilde uygulanmıştır. Bir robota etkileyen toplam kuvveti bulurken Eşitlik-1 kullanılmaktadır. Bu eşitlikte N adet robottan oluşan bir sistem için d_i i. robota olan mesafe, \hat{u}_i i. robotun konumuna bağlı olarak birim vektör, k değeri ise bölge katsayısıdır. Bölge katsayısı olan k değeri ayrılma bölgesinde -1, hizalanma bölgesinde 0 ve birleşme bölgesinde 1 değerini almaktadır. k değeri 0 olduğunda herhangi bir boids sanal kuvvetlerinin toplamı sıfır olacağından etkileyen kuvvet sadece sürü elemanları için atanmış olan F_t kuvvetidir. Bu kuvvet hedef noktaya doğrudur ve büyüklüğü PID ile değiştirilmektedir. Kuvvetlerin toplamı olan F_b 'nin büyüklüğü robotlarda hız değeri, F_b 'nin yönü ise hedef yön olarak kullanılmaktadır. Hız değeri için alt ve üst sınırlandırma kullanılmıştır. Hedef yön değerine ulaşma için robotlarda PID denetim kullanılmaktadır. Algoritmada öncelikle desen düzen merkezine ait hedef nokta alınmaktadır. Tüm robotlara ait kuvvetler uygulandıktan sonra robota hedef doğru gitmesi için de bir F_t sanal kuvveti uygulanır. Böylece tüm robotlar hizalanmayı korurken desen düzeninin merkezine birlikte gidebilmektedir.

$$F_b = \sum_{i=1}^{N-1} k * \frac{\hat{u}_i}{d_i^2} + F_t \quad (1)$$

Çoklu robot sistemindeki tüm robotlar konum ve hız verilerini paylaştıktan sonra her robot diğer robotların kendisine göre uzaklığını hesaplar. Hesaplama sonucu diğer tüm robotların bulunduğu bölgeye göre itme, çekme veya hizalanma kuvvetleri uygulanır. Eğer

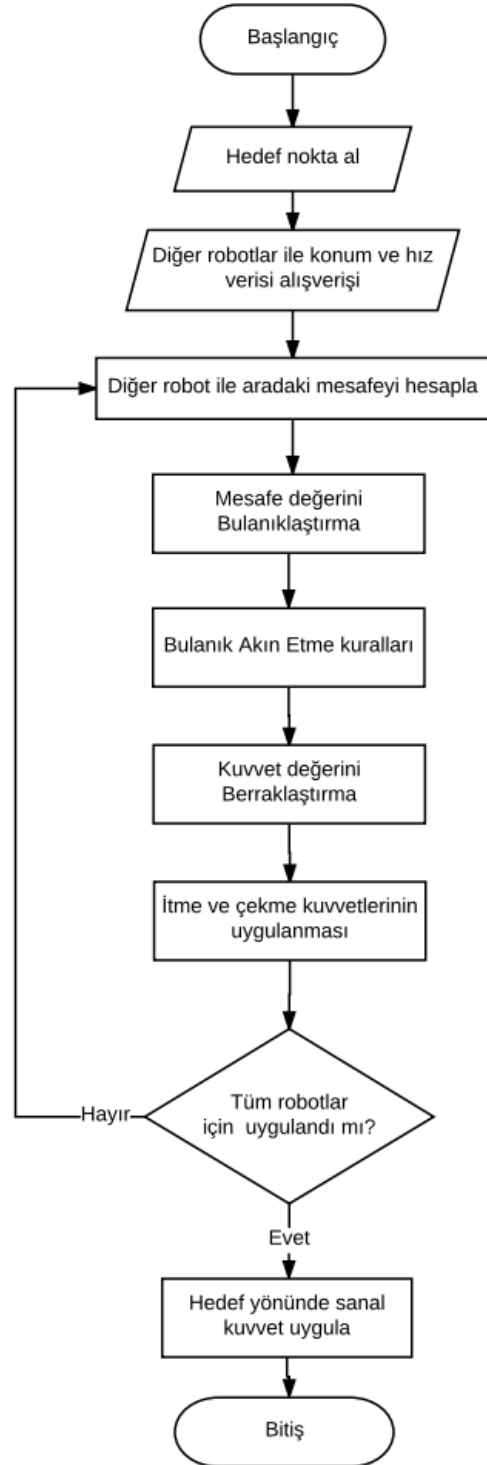
robotlar algılama bölgesi içinde değil ise hesaba katılmaz.

giriş üyelik fonksiyonları olan Ayrılma, Hizalanma ve Birleşme kümeleri Şekil-4’de gösterildiği üzeredir. Çıkışta üretilecek olan itme, çekme ve hedefe gitme kümeleri de üçgen fonksiyon olarak tanımlanmış olup ise Şekil-5’de gösterilmişlerdir. Bulanık mantık kuralları ise Çizelge 1’de verilmiştir.



Şekil 2. Error! No text of specified style in document.. Türetilmiş Boids Algoritması (Derived Boids Algorithm)

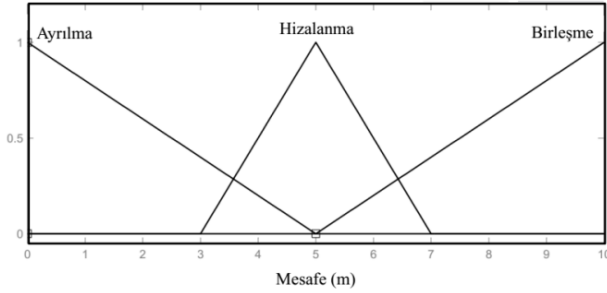
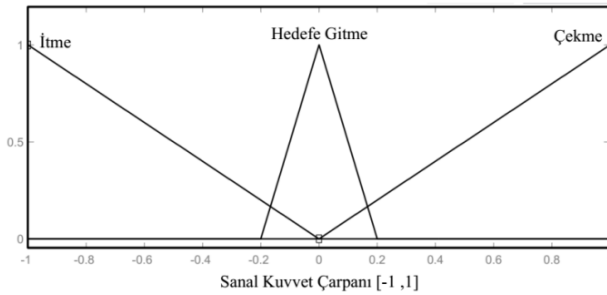
Akın etme algoritmasında tanımlı Boids bölgeleri kesin sınırlardan oluşmaktadır. Boids bölge sınırları robotların hareket yeteneği, sensörlerin algılama mesafesi, kullanıcının istediği sıklık, haberleşme kapsama alanı vb. parametrelere bağlı olarak özelleştirilebilmektedir. Bu bölgelerin kesin çizgiler halinde uygulanması robotlara çok ani kuvvetler uygulanmasına sebep olabilmektedir. Bu durum da özellikle hızlı hareket eden uçan robotlar gibi sistemler için olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Bu sebeple Boids bölgelerinin bulanıklaştırılması ve uygulanan kuvvetin yön ve şiddetinin daha doğal hale çevrilmesi amaçlanarak Şekil-3’deki bulanık akın etme algoritması tasarlanmıştır. Bu algoritmada robotlar arası mesafe değeri öncelikle bulanıklaştırılmaktadır. Bulanıklaştırma aşamasında üyelik fonksiyonları üçgen fonksiyon olarak tanımlanmıştır. Her robotun algılama mesafesi en fazla 10m olarak kabul edilmiştir. Buna göre



Şekil 3. Bulanık Akın Etme Algoritması (Fuzzy Flocking Algorithm)

Çizelge 1. Bulanık Akın Etme Kuralları (Fuzzy Flocking Rules)

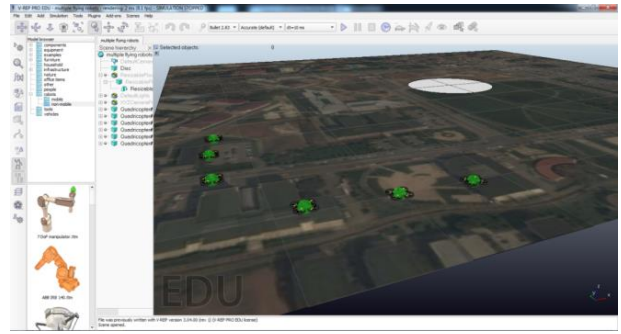
| Kural |
|---|
| Eğer Mesafe Ayrılma Kümesinde ise Sanal Kuvvet Çarpanı değeri İtme kümesindedir |
| Eğer Mesafe Hizalanma Kümesinde ise Sanal Kuvvet Çarpanı Hedefe Gitme kümesindedir. |
| Eğer Mesafe Birleşme Kümesinde ise Sanal Kuvvet Çarpanı değeri Çekme kümesindedir. |

**Şekil 4.** Bulanık Giriş Üyelik Fonksiyonları (Fuzzy Input Membership Functions)**Şekil 5.** Bulanık Çıkış Üyelik Fonksiyonları (Fuzzy Output Membership Functions)

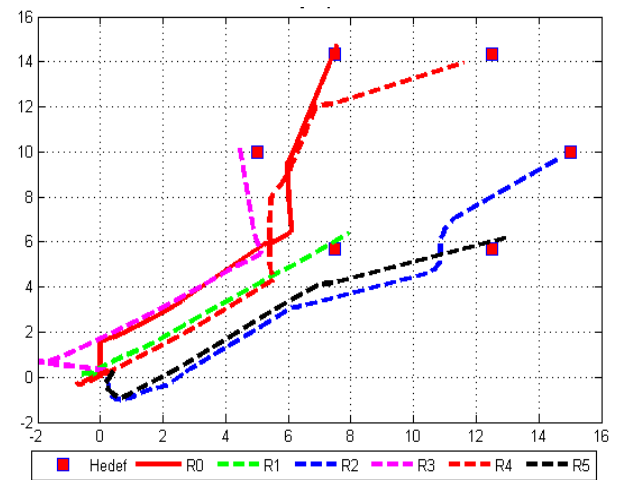
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

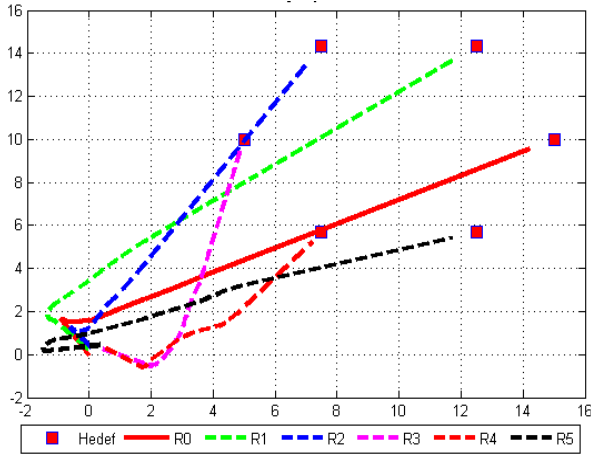
Çoklu robot denetimi uygulaması Şekil 6'da ekran görüntüsü verilen V-REP [23] benzetim ortamında yapılmıştır. Altı robot dört rotorlu hava aracı olarak alta bakan ve ileri yönde bakan kameralar eklenerek modellenmiştir. Robotların çoklu denetimi, konumlandırması ve veri günlüklemesi için Python programlama dili kullanılmıştır. V-REP benzetim programına uzaktan erişim sağlama amacıyla Python-Remote API Kütüphanesi kullanılmıştır. Öznitelik eşleme tabanlı konumlandırma işlemi için ise OpenCV 2.7 kütüphanesinin Python diline uygun kütüphanesi kullanılmıştır. Benzetim uygulamasında uydu fotoğrafı yer deseni olarak kullanılmış ve öznitelik eşleme tabanlı konumlandırma sistemi destek amaçlı kullanılmıştır. Çoklu robot benzetiminde robotların çember şeklindeki bir desen şeklini almak için belirli hedeflere gitmeleri işbirliği ve yarışma olmak üzere iki ana grupta ele alınmıştır. İşbirliği açısından çoklu robot çalışması bireysel, işbirlikli ve bulanık işbirlikli olarak üç şekilde incelenmiştir. Yarışma kısmında ise robotların hedef atamasının en yakın noktaya yarışarak kapması ve

önceden atanmış olması şeklinde iki şekilde incelenmiştir. Bu kısımda verilen çalışmalar sırasıyla bireysel yarışan, bireysel önceden atanmış, işbirlikli yarışan, işbirlikli önceden atanmış, bulanık işbirlikli yarışan ve bulanık işbirlikli önceden atanmış şeklindedir. Son olarak bu uygulamaların haberleşme tekrar sayıları ve işlem tamamlama süreleri verilmiştir.

**Şekil 6.** V-REP Benzetim Ortamı (V-REP Simulation Environment)

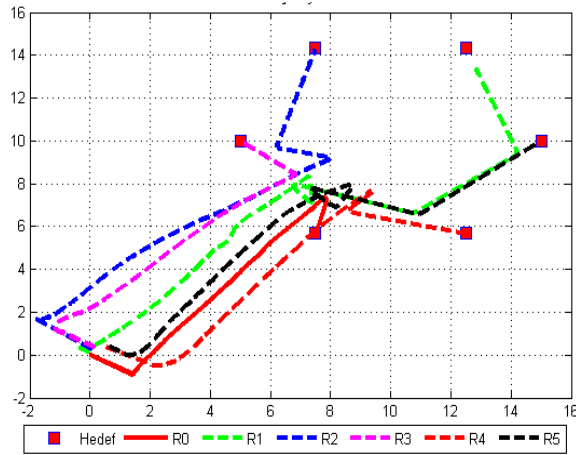
Robotların bireysel olarak çalışması esnasında akın algoritmasının birleşme ve hizalanma kuralları kullanılmadan sadece çarpışma önleme için ayrılma kısmının çalıştırılması ve robotların hedeflere gitmesi gerçekleşmektedir. Robotların bireysel olarak yarışarak hedefe gitme uygulaması sonucu robotların izlediği yollar Şekil 7'de gösterilmiştir. Robotların bireysel olarak önceden atanmış hedefe gitme uygulamasında robotların izlediği yollar Şekil 8'de gösterilmiştir.

**Şekil 7.** Bireysel Robotların Yarışarak Hedeflere Ulaşması (Individual Robots Reaching Goals by Competing)

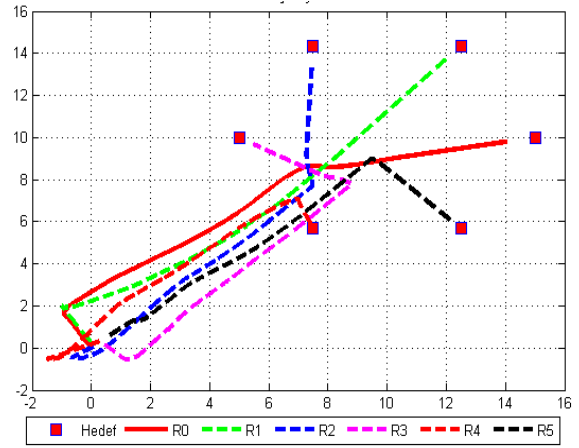


Şekil 8. Bireysel Robotların Önceden Atanmış Hedeflere Ulaşması (Individual Robots to Reach Pre-Assigned Targets)

Robotların işbirlikli olarak çalışması esnasında akın algoritmasının desen merkezine kadar çalıştırılıp daha sonra robotların hedeflere gitmesi gerçekleşmektedir. Robotların işbirlikli olarak yarışarak hedefe gitme uygulaması sonucu robotların izlediği yollar Şekil 9’da gösterilmiştir. Robotların işbirlikli olarak önceden atanmış hedefe gitme uygulamasında robotların izlediği yollar Şekil 10’da gösterilmiştir.

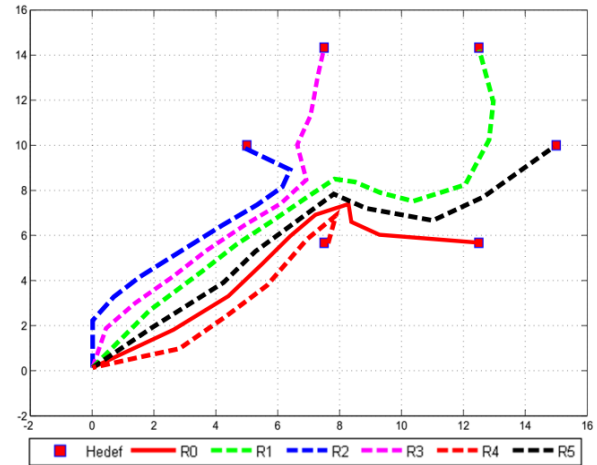


Şekil 9. İşbirlikli Robotların Hedeflere Yarışarak Ulaşması (Cooperative Robots Reach Goals by Competing)



Şekil 10. İşbirlikli Robotların Önceden Atanmış Hedeflere Ulaşması (Cooperative Robots Reach Pre-assigned Targets)

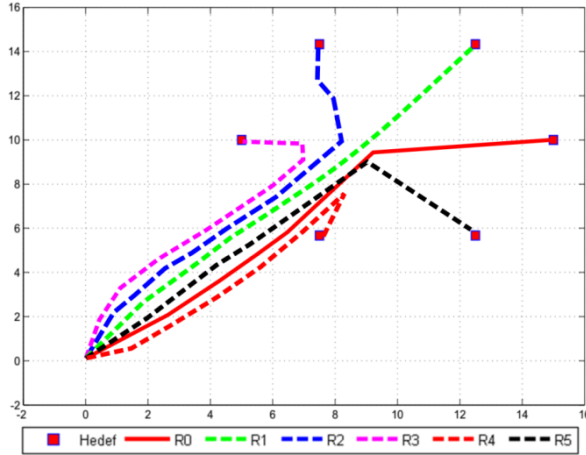
Robotların bulanık akın algoritması ile işbirlikli olarak çalışması esnasında bulanık akın algoritmasının desen merkezine kadar çalıştırılıp daha sonra robotların hedeflere gitmesi gerçekleşmektedir. Robotların bulanık akın algoritması ile işbirlikli olarak yarışarak hedefe gitme uygulaması sonucu robotların izlediği yollar Şekil 11’de gösterilmiştir. Robotların işbirlikli olarak önceden atanmış hedefe gitme uygulamasında robotların izlediği yollar Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Bulanık İşbirlikli Robotların Yarışarak Hedeflere Ulaşması (Fuzzy Cooperative Robots Reach Goals by Competing)

Çizelge 2. Düzen Alma İşleminin Tamamlaması için Haberleşme Tekrar Sayısı ve Geçen Süreler (Communication Iterations and Elapsed Time for Completion of Formation)

| Uygulama | Haberleşme Tekrarı | Süre (dk) |
|------------------------------------|--------------------|-----------|
| Bireysel Yarışmacı | 617 | 5.15 |
| Bireysel Önceden Atanmış | 352 | 2.94 |
| İşbirlikli Yarışmacı | 652 | 5.43 |
| İşbirlikli Önceden Atanmış | 295 | 2.45 |
| Bulanık İşbirlikli Yarışmacı | 635 | 5.30 |
| Bulanık İşbirlikli Önceden Atanmış | 270 | 2.25 |



Şekil 12. Bulanık İşbirlikli Robotların Yarışarak Hedeflere Ulaşması (Fuzzy Cooperative Robots Reach Pre-assigned Targets)

Robotların düzen alma işlemlerini tamamlama süreleri ve bu sürede yaptıkları haberleşme tekrar sayıları Çizelge 2’de verilmiştir. Buna göre yarışmacı sistemlerin görevi tamamlaması daha uzun sürdüğü görülmektedir. Yarışmacı sistemlerden bireysel uygulama toplamda 5.15 dakika süren 617 tekrar haberleşme kaydı içermektedir. İşbirlikçi yarışmacı sistem ise 652 tekrar haberleşme kaydı içermekte ve toplam 5.43 dakika sürmüştür. Önceden atanmış hedefler çalışan uygulamalarda tamamlama süresi daha kısadır ve bireysel sistem için 352 tekrar haberleşme kaydı içermektedir. Bu uygulamada görev tamamlama 2.94 dakika sürmüştür. İşbirlikçi önceden tanımlı hedeflerle çalışan sistemde görev tamamlama 295 tekrar haberleşme kaydı içermektedir ve toplam 2.45 dakika sürmüştür. Bulanık akın algoritması ile çalışan işbirlikli sistemlerde ise önceden atanmış hedeflerle elde edilen sonuç 270 haberleşme tekrarı ve görev tamamlama süresi 2.25’dk olmuştur. Yarışmacı bulanık işbirlikli çalışma sonucu ise 635 haberleşme tekrarı ve 5,30’dk görev tamamlama süresidir.

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Çalışma sonucunda birden fazla robotun bireysel, işbirlikli ve bulanık-işbirlikli halde akın etmesi ve düzen alması incelenmiş ve türetilen bulanık-işbirlikli algoritmanın başarımı sınanmıştır. Sınama işlemi için benzetim hazırlanmış olup bu benzetimde robotların bireysel ve kolektif davranışları yarışmacı ve önceden tanımlı olma parametreleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada sırasıyla benzetim ortamında kullanılan robot ve görev algoritmaları sunulmuş olup ardından benzetim sonuçları verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre:

- Yarışmacı sistemler, görev tamamlama süresi ve işlem tekrarı açısından yavaş kalmaktadır.
- Çoklu robot yapılarında toplu halde hareket etmede topluluk içinde yarışma olmaz ise yalnız başına çalışan sistemlerden daha hızlı şekilde düzen deseni içinde dağılım sağlanabilmektedir.

- Çoklu robotlarda daha yüksek performans almak için görev paylaşımı daha önceden sistemde fikir birliği içinde çözülmeli veya kullanıcı tarafından atanmalıdır.
- Bulanık akın algoritması. Boids algoritmasından türetilen akın algoritmasından daha kısa görev tamamlama süresi ve daha az haberleşme tekrarı sağlamaktadır. Bu açıdan bakıldığında tasarlanan bulanık akın algoritmasının başarımı daha yüksektir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenen 2015 FBE031 kodlu “Özdeş Olmayan Bileşenlerden Oluşan Multikopter Yapıları ve Çoklu Yapı Uygulamaları: Sürü Modelleri Tasarımı” adlı doktora tez projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde katkı sağlayan Pamukkale Üniversitesi’ne teşekkür eder.

KAYNAKLAR(REFERENCES)

- [1] A. Ç. Seçkin, C. Karpuz, and A. Özek, “Feature matching based positioning algorithm for swarm robotics,” *Comput. Electr. Eng.*, (2016).
- [2] L. Bayındır, “A review of swarm robotics tasks,” *Neurocomputing*, 172: 292–321, (2016).
- [3] L. Bayındır and E. Şahin, “A review of studies in swarm robotics,” *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 15(2): 15–147, (2007).
- [4] A. Ç. Seçkin, C. Karpuz, and A. Özek, “Sürü Robotiği,” presented at the UBMK’16 - *Uluslararası Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Konferansı*, Tekirdağ Turkey, 414–419, (2016).
- [5] S. Kloder and S. Hutchinson, “Path planning for permutation-invariant multirobot formations,” *Robot. IEEE Trans. On*, 22(4): 650–665, (2006).
- [6] A. I. Mourikis and S. I. Roumeliotis, “Performance analysis of multirobot cooperative localization,” *Robot. IEEE Trans. On*, 22(4): 666–681, (2006).
- [7] G. Vásárhelyi et al., “Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots,” *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, 3866–3873, (2014).
- [8] G. López-Nicolás, M. Aranda, and C. Sagüés, “Multi-robot Formations: One Homography to Rule Them All,” in *ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference: Advances in Robotics*, 1: 703–714, (2014).
- [9] M. Aranda, G. López-Nicolás, C. Sagüés, and Y. Mezouar, “Formation control of mobile robots using multiple aerial cameras,” *IEEE Trans. Robot.*, 31(4): 1064–1071, (2015).
- [10] M. J. Mataric, “Designing emergent behaviors: From local interactions to collective intelligence,” *Second International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, 432–441, (1993).
- [11] C. W. Reynolds, “Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model,” *ACM SIGGRAPH Comput. Graph.*, 21(4): 25–34, (1987).
- [12] C. W. Reynolds, “Steering behaviors for autonomous characters,” *Game developers conference*, 763–782, (1999).

- [13] H. H. Lund and L. Pagliarini, "Robot soccer with LEGO mindstorms", *Robot Soccer World Cup*, 141–151, (1998).
- [14] N. Bouraqadi, A. Doniec, and E. M. de Douai, "Flocking-based multi-robot exploration", *National conference on control architectures of robots*, (2009).
- [15] Ö. Ahmet and M. Sinecen, "klima sistem kontrolünün bulanık mantık ile modellenmesi," *Pamukkale Üniversitesi Mühendis. Bilim. Derg.*, 10(3): 353–358, (2004).
- [16] Ç. Gençer and A. Coşkun, "Robust Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motors Using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System Controllers," *Asian J. Inf. Technol.*, 4(10): 918–919, (2005).
- [17] A. Coşkun and Y. Yılmaz, "Bone Age Assessment with Fuzzy Logic," *RA Journal of Applied Research*, 3(12): 1288-1294, (2017)
- [18] F. Bozkurt, A. Ç. Seçkin, and A. Coşkun, "Integration of IMU Sensor on Low-Cost EEG and Design of Cursor Control System with ANFIS," *Int. J. Eng. Trends Technol.*, 54(3): 162–169, (2017).
- [19] I. L. Bajec, M. Mraz, and N. Zimic, Boids with a fuzzy way of thinking. Anaheim: *ACTA Press*, (2003).
- [20] I. L. Bajec, N. Zimic, and M. Mraz, "Simulating flocks on the wing: the fuzzy approach," *J. Theor. Biol.*, 233(2): 199–220, (2005).
- [21] Z. Wang and D. Gu, "Behaviour based fuzzy flocking systems", *Fuzzy Systems Conference-FUZZ-IEEE 2007*. IEEE International, 1–6, (2007).
- [22] X. Zhong and G. Cao, "Fuzzy boids using a dynamic weighting method based on Gauss circle", *Control Conference (CCC) 35th Chinese*, 7567–7571, (2016).
- [23] E. Rohmer, S. P. Singh, and M. Freese, "V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework", *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 1321–1326, (2013).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Kablosuz algılayıcı ağlarda küme başı kapsama alanının farklı ağ boyutları ve düğüm sayıları altında ağ yaşam süresine etkisi

The effect of the range of cluster head on the lifetime of wireless sensor networks under various sizes of network and number of nodes

Yazar(lar) (Author(s)): İpek ABASIKELEŞ-TURGUT

ORCID : 0000-0002-5068-969X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Abasıkeleş-Turgut İ., “Kablosuz algılayıcı ağlarda küme başı kapsama alanının farklı ağ boyutları ve düğüm sayıları altında ağ yaşam süresine etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 921-926, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.435581

Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Küme Başlı Kapsama Alanının Farklı Ağ Boyutları ve Düğüm Sayıları Altında Ağ Yaşam Süresine Etkisi

Araştırma Makalesi / Research Article

İpek ABASIKELEŞ-TURGUT*

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Müh. Bölümü, İskenderun Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 22.06.2018 ; Kabul/Accepted : 12.12.2018)

ÖZ

Kablosuz Algılayıcı Ağlarda (KAA) kaynakların kısıtlı olmasından dolayı enerjinin verimli bir şekilde kullanılması problemi, kümeleme tabanlı mimarilerin bu ağlarda yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Literatürde bu alanda yapılan çalışmalar; küme başlı seçiminde farklı parametreler kullanma, zamana dayalı küme başlı seçimi veya yapay zekâ algoritmalarıyla küme oluşumu gibi farklı yöntemlerle enerjinin ağda verimli bir şekilde kullanılmasını amaçlamaktadır. Oluşturulan kümelerin kapsama alanı bazı çalışmalarda tüm ağı kapsayabilecek genişlikte seçilirken, diğerlerinde sınırlandırılmıştır. Bu çalışmada küme başlı kapsama alanı parametresinin ağ yaşam süresine olan etkisi ayrıntılı benzetimlerle incelenmiştir. Farklı düğüm sayıları, farklı kapsama alanları ve farklı ağ genişlikleri kullanılarak ilk, orta ve son düğüm ölümleriyle dışarıda kalan düğüm sayıları raporlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre küme başlı kapsama alanının artması ilk düğüm ölümlerini geciktirirken, orta ve son düğüm ölümlerinin daha erken yaşanmasına neden olmaktadır. Ağ alanının artması ise tüm düğüm ölümlerini daha erken bir döngüye çekerken en yüksek oranda etkiyi ilk düğüm ölümlerinde, en az etkiyi ise son düğüm ölümlerinde sergilemektedir. Düğüm sayısı arttıkça ilk düğüm ölümleri daha erken bir döngüye çekilirken, orta ve son düğüm ölümlerinde gecikmeler elde edilmektedir. Elde edilen sonuçların ışığında bu çalışmanın, gelecekte hem gerçek zamanlı hem de benzetim ortamında tasarlanacak olan kümeleme tabanlı mimarilerde küme kapsama alanının tasarım tercihlerine uygun olarak seçilmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz algılayıcı ağlar, kümeleme tabanlı yönlendirme, kapsama alanı, performans analizi, enerji verimliliği, benzetim.

The Effect of the Range of Cluster Head on the Lifetime of Wireless Sensor Networks Under Various Sizes of Network and Number of Nodes

ABSTRACT

The problem of energy efficiency due to the limited resources in Wireless Sensor Networks (WSNs) has made cluster-based architectures widespread use in these networks. The studies in literature regarding WSNs aim to make efficient use of battery in network by different methods such as using different parameters in cluster head selection, time-based cluster head election or clustering with artificial intelligence algorithms. The coverage area of clusters is selected in a range that can cover the whole network in some studies, while it is limited in others. In this study, the effect of the cluster-head coverage area parameter on the lifetime of the network is investigated with detailed simulations. The death of the first, middle, and last node are reported by using different numbers of nodes, coverage areas, and network sizes. According to the results obtained, the increase of the cluster coverage area causes the first node deaths to be delayed and the middle and last node deaths to occur earlier. The increase of the network area takes all the node measurements at an early cycle while the first node is at the highest level and the last node at the lowest level. As the number of nodes increases, the first node deaths are delayed to an earlier cycle, while the middle and final node deaths are delayed. In the light of the results obtained, it is thought that this study will help the cluster coverage area to be selected according to the design preferences in clustering based architectures that will be designed both in real time and in the simulation environment in future.

Keywords: Wireless sensor networks, cluster based routing, coverage area, performance evaluation, energy efficiency, simulation.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ağı oluşturan algılayıcı düğümlerin düşük maliyet ve düşük güç tüketimine sahip olması, esnek iletişim kullanarak kolaylıkla koordine olmaları gibi birçok

avantajı sayesinde Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA), modern tarımdan, akıllı taşımacılığa; sağlık izlemeden, askeri uygulamalara kadar çok geniş bir yelpazede kullanım alanı bulmaktadır [1,2].

Ağı oluşturan düğümlerin batarya, işlemci, radyo ve algılama gibi kaynaklarının kısıtlı olması, KAA'nın maliyetinin ve güç tüketiminin düşük olmasını sağlarken;

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ipek.abasikeles@iste.edu.tr

beraberinde birçok sorun getirmektedir. Kapsama alanı, güvenlik, enerji verimliliği, lokalizasyon gibi problemler arasında KAA'nın en kritik sorunu, enerji verimliliğidir [1]. Literatürde, KAA'da enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasını amaçlayan çok sayıda çalışma yer almaktadır [3-6].

KAA'yı oluşturan düğümler genellikle insan müdahalesinin mümkün olmadığı zorlu şartlar altında konumlandıkları için bataryaları tükendiğinde yenilenmesi mümkün olmamaktadır. Dolayısı ile ağın işleyiş süresi düğümlerin bataryalarının verimli bir şekilde kullanılması ile doğrudan bağlantılıdır. Bu nedenle kümeleme tabanlı yönlendirme protokolleri düğümlerin veri iletiminde verimli batarya kullanımını sağladığı için literatürde sıklıkla tercih edilmektedir [1].

Düşük Enerjili Uyarlanabilen Kümeleme Mimarisi (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy - LEACH) [7] protokolü kümeleme mimarisini ilk kez öneren ve bugün bile birçok çalışmada kıyaslama amacıyla kullanılan temel bir protokoldür. LEACH, küme başlarının rasgele bir şekilde dinamik ve dağıtık olarak belirlenmesini önerir. Küme başı olarak seçilen düğüm, tüm ağa yayım yaparak kümesini oluşturur. LEACH protokolünü temel alarak geliştirilen birçok kümeleme tabanlı protokole; küme başı seçiminde çeşitli parametreler kullanmayı [1,2], kümeleme oluşumunda zamana dayalı yaklaşımları [8-10], bulanık mantık [11,12], parçacık sürü optimizasyonu [13, 14] vb. yöntemler ile küme oluşturmayı içeren birçok yöntem önerilmiştir. Bu yaklaşımların bir kısmında küme başı olarak seçilen düğüm kendisini tanıtmak amacıyla tüm ağa yayım yaparken [1,7,10], diğerlerinde sadece belirli bir kapsama alanına yayım yapar [8,9]. Tüm ağa yapılan yayım daha fazla enerji tüketimine sebep olurken hiçbir düğümün açıkta kalmayacağını garantiler. Bununla birlikte yayım işlemi sınırlı bir alana yapıldığında, ağın enerjisinin daha verimli bir şekilde kullanılması sağlanırken hiçbir kümeye katılmayan (yani açıkta kalan) düğümler oluşmaktadır. Açıkta kalan düğümlerin verilerini doğrudan baz istasyonuna iletmek zorunda olmaları, daha fazla enerji harcamalarına neden olur. Hangi yaklaşımın enerji tüketimi açısından daha avantajlı olacağının tespit edilmesi için çalışmalar yapılması gerekmektedir.

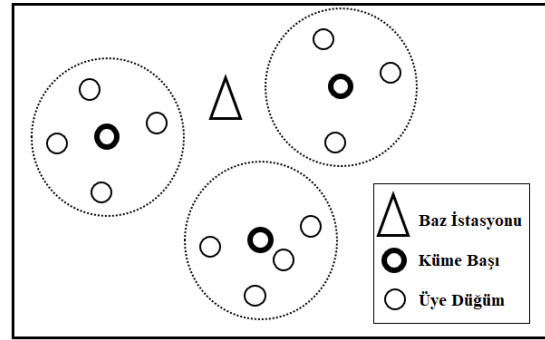
KAA'nın toplam maliyetinin belirlenmesinde, ağın kapsayıcılığını eniyileyecek şekilde kümeleme alanlarının oluşturulması oldukça önem arz eder [15]. Bu amaçla, en uygun küme başı sayısını [15-17], iletişim adımı sayısını [18], düğüm yoğunluğunu [18] ve küme başı pozisyonlarını [18] belirlemek için literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bununla birlikte, küme başlarının kapsama alanı da kümeleme alanını etkileyen önemli bir parametredir. Ancak, literatürde küme başlarının kapsama alanları ile ilgili yapılan bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmada, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, KAA'da küme başının iletim yaptığı kapsama alanının ağ yaşam süresi üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla farklı kapsama alanları, farklı düğüm sayıları ve farklı ağ alanları kullanılarak yapılan

ayrıntılı benzetimlerde ağdaki ilk, orta ve son düğümün öldüğü döngüler ile açıkta kalan düğüm sayıları incelenmiştir. Elde edilen sonuçların ışığında bu çalışmanın, gelecekte hem gerçek zamanlı hem de benzetim ortamında tasarlanacak olan kümeleme tabanlı mimarilerde küme kapsama alanının tasarım tercihlerine uygun olarak seçilmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Bölüm 2'de kümeleme tabanlı KAA yapısı anlatılırken, Bölüm 2'te benzetim ortamı ve parametreleri tanıtılmıştır. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4'te verilirken, son bölüm olan Bölüm 5 ile çalışma sonlandırılmıştır.

2. KÜMELEME TABANLI YÖNLENDİRME ÇATISI (CLUSTER-BASED ROUTING FRAMEWORK)

Kümeleme tabanlı bir KAA'da ağdaki düğümler, küme yapısı altında organize olarak veri iletimini gerçekleştirirler. Şekil 1'de görüldüğü üzere kümeleme tabanlı bir KAA, 3 temel eleman içerir: baz istasyonu, küme başı ve üye düğüm. Üye düğümler ortamdaki algıladıkları verileri küme başlarına iletirken; küme başları üyelerinden topladığı verileri birleştirerek baz istasyonuna iletir.



Şekil 1. Kümeleme tabanlı KAA mimarisi (Cluster-based WSN architecture)

Ağı işleyiş ardaşık döngüler halindedir. Her döngü sıralı iki aşamadan oluşur: küme oluşumu ve veri iletimi. Küme oluşumunda öncelikle küme başları seçilir. Bir düğümün küme başı olup olmayacağı kararı düğümler tarafından birbirlerinden bağımsız olarak verilebileceği gibi merkezi bir otorite tarafından belirlenip ilgili düğümlere de iletilebilir. İlk yaklaşım dağıtık kümeleme olarak adlandırılır ve merkezi bir aygıt bağımlılığın olmaması sayesinde KAA'nın doğasına daha uygundur. Bu nedenle literatürdeki birçok çalışma dağıtık kümeleme yaklaşımını kullanır [19]. Seçim aşamasından sonra küme başları, R_c yarıçaplı bir alana küme başı olduklarını bildiren ve kimlik, konum vb. bilgileri içeren bir REKLAM mesajı yayımlarlar. Reklam mesajlarını alan sıradan düğümler kendilerine en yakın küme başını seçerek ona BAĞLANMA_İSTEK mesajı yollar. Küme başları, talepleri topladıktan sonra, kendi kümesine bağlı olan üye düğümler için Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access - TDMA) çizelgesi

hazırlar ve üyelerine BAĞLANMA_ONAY mesajı içerisinde iletim yapacakları zaman aralıklarını bildirir. Bu mesajın üye düğümlere ulaşmasının ardından kümeleme oluşumu tamamlanmış olur ve döngünün ikinci aşaması olan veri iletim aşaması başlar. Üye düğümler kendilerine bildirilen zaman aralıklarında verilerini VERİ_ÜYE paketi içerisinde küme başlarına iletirler. Küme başları bu verileri topladıktan sonra veri birleştirme işlemi uygular ve son veriyi VERİ_KÜMEBAŞI paketinin içerisinde ya doğrudan baz istasyonuna ya da bir başka küme başına iletir. Verilerin tamamı baz istasyonuna ulaştığında döngü tamamlanır ve düğümler bir sonraki döngü için hazırlanır. Kümeleme tabanlı bir KAA'da üretilen mesajlar Çizelge 1'de görülmektedir.

Benzetimlerde kullanılan ağ parametreleri Çizelge 2'de görülmektedir. Bu çalışmada radyo modeli olarak Doğrusal Radyo Modeli (First Order Radio Model - FORM) [7] tercih edilmiştir. Enerji tüketimi hesaplamalarında kullanılacak olan eşik mesafesi 87 metredir. Sistemde enerjinin verimli bir şekilde kullanılması için gereken en uygun küme başı sayısının 3 ve 5 arasında olduğu bildirilmiştir [21]. Bu nedenle bu çalışmada istenilen küme başı sayısı TB-LEACH'de olduğu gibi 4 olarak alınmıştır. Ağdaki algılayıcı düğümler homojendir ve başlangıç enerjileri 0.5 J'dir. 100 m x 100 m ve 200 m x 200 m olmak üzere iki farklı ağ alanı üzerine 100 ve 200 düğüm rasgele konumlara yerleştirilmiştir. Seçilen küme başlarının kapsama alanı olarak 30 m, 50 m, 60 m, 80 m, 100 metre ve tüm ağı kapsayacak mesafe değerleri alınmıştır. Sistemde

Çizelge 1. Kümeleme tabanlı KAA'da üretilen mesajlar (Messages created by a cluster-based WSN)

| Ad | Nereden - Nereye | Veri / Kontrol | Açıklama |
|----------------|-------------------------|----------------|------------------------------|
| REKLAM | Küme Başı - R_c alanı | Kontrol | Küme başının ilan mesajı |
| BAĞLANMA İSTEK | Üye - Küme Başı | Kontrol | Kümeye katılma talebi |
| BAĞLANMA ONAY | Küme Başı - Üye | Kontrol | Kümeye katılma onayı |
| VERİ ÜYE | Üye - Küme Başı | Veri | Üyelerin veri iletimi |
| VERİ KÜMEBAŞI | Küme Başı - Baz | Veri | Küme başlarının veri iletimi |

Bu çalışmada kullanılan kümeleme tabanlı protokol, literatürde bu alanda yapılmış en temel protokol olarak kabul edilen LEACH protokolü temel alınarak geliştirilen Zamana Dayalı Düşük Enerjili Uyarlanabilen Kümeleme Mimarisi (Time-Based Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy - TB-LEACH) [10] protokolüdür. TB-LEACH protokolü, LEACH protokolünden farklı olarak önerdiği küme başı seçiminde zamana dayalı yaklaşım sayesinde, ağda istenilen sayıda küme başı oluşmasını garantileyerek kümeler arasında daha dengeli bir yük dağıtımını sağlar.

3. BENZETİM ORTAMI (SIMULATION ENVIRONMENT)

Bu çalışmada, ilk olarak, benzetim tekniği kullanılarak TB-LEACH protokolü modellenmiştir. Ardından küme başları, reklam mesajlarını yayınlamak için farklı büyüklüklerde alanlar (farklı R_c) seçtiğinde ağ yaşam süresinin ve dışarıda kalan (hiçbir kümeye dâhil olmayan) düğüm sayısının değişimi gözlemlenmiştir.

KAA'da ağı oluşturan düğümler, veri iletimi, haberleşme vb. işlemler için enerji harcarlar ve belirli bir süre sonra enerjileri tükendiğinde sistemden ayrılırlar. Bu duruma düğüm ölümü adı verilir. KAA'da ağdaki tüm düğümlerin öldüğü döngü, ağın yaşam süresi olarak adlandırılır ve ağın performansını ölçmede kullanılan önemli bir parametredir [20]. Bununla birlikte ağdaki ilk düğümün [1] ve orta düğümün öldüğü döngüler [2] de bu amaçla kullanılan diğer önemli değerlendirme ölçütleridir. Bu çalışmada sistemin performansının değerlendirilmesinde hem ilk ve orta hem de son düğüm ölümleri kullanılmıştır.

üretilen kontrol paketleri 25 bayt, veri paketleri ise 250 bayt uzunluğundadır.

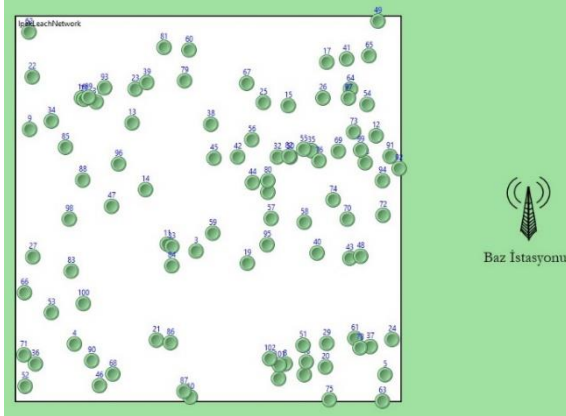
Çizelge 2. Benzetim Parametreleri (Simulation Parameters)

| Parametreler | Değerler | |
|------------------------------|--|------------------------------|
| Ağ alanı | 100 m x 100 m 200 m x 200 m | |
| Düğüm Sayısı | 100 ve 200 | |
| Küme Yarıçapı (R_c) | 100 m, 80 m, 60 m, 50 m, 30 m ve tüm ağ alanı | |
| Küme başı sayısı | 4 | |
| FORM Parametreleri | E_{elec} | 50 nJ/bit |
| | E_{fs} | 10 pJ/bit/m ² |
| | E_{mp} | 0,0013 pJ/bit/m ⁴ |
| | E_{DA} | 5 nJ/bit/sinyal |
| Veri paketi boyu | 250 bayt | |
| Kontrol paket boyu | 25 bayt | |
| Başlangıç enerjisi (E_0) | 0,5 J | |
| Eşik mesafesi (d_0) | 87 m | |

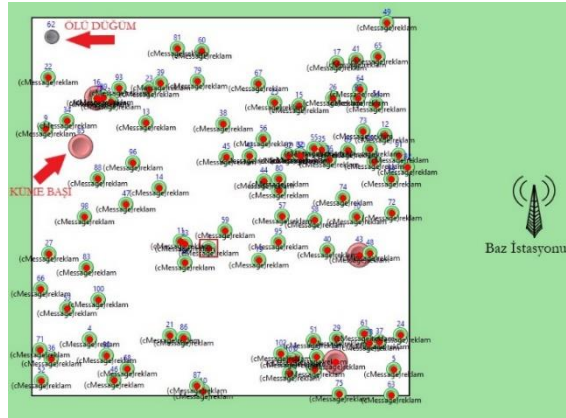
4. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Şekil 2'de görüldüğü üzere OMNeT++ benzetim programı kullanılarak oluşturulan 100 düğümlü bir KAA'nın çalıştırılması sırasında ilk düğümün öldüğü anda ağın görüntüsü Şekil 3'te; 50. düğümün (düğümlerin yarısının) öldüğü anda ağın görüntüsü Şekil 4'te; 100. düğümün (son düğümün) öldüğü andaki ağ görüntüsü ise Şekil 5'te görülmektedir. Şekillerde görüldüğü üzere baz istasyonuna uzak olan düğümler, verilerini uzak mesafeler boyunca iletmek zorunda olacakları için bataryalarını daha erken döngülerde tüketmektedir. Baz

istasyonuna konum olarak daha yakın olan düğümler ise ağın son döngülerine kadar hayatlarını devam ettirebilmektedir.



Şekil 2. OMNeT++ üzerinde çalıştırılan 100 düğümlü bir KAA (a 100 node WSN running on OMNeT++ simulation program)

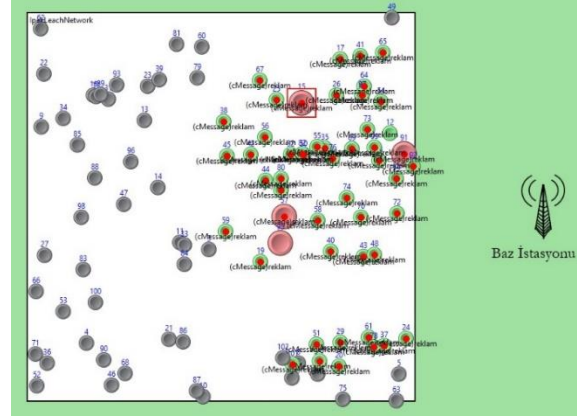


Şekil 3. OMNeT++ üzerinde çalıştırılan 100 düğümlü bir KAA'da ilk düğümün öldüğü anda ağın görüntüsü (Screenshot of a 100 node WSN running on OMNeT++ simulation program at the death of the first node)

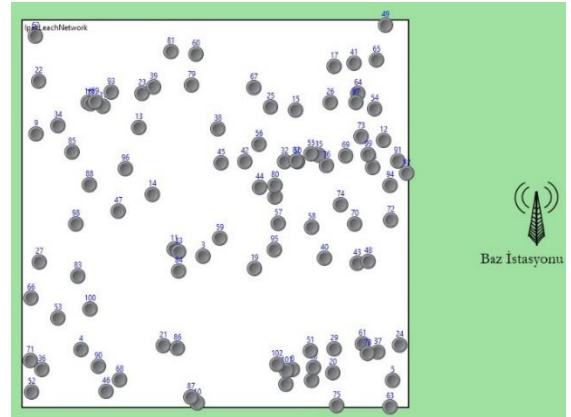
Çizelge 3'ten Çizelge 6'ya kadar sırasıyla 100 x 100 ve 200 x 200'lük ağ alanlarında 100 ve 200 düğüm için çalıştırılan benzetim sonucunda elde edilen ilk, orta ve son düğümlerin öldükleri döngü ile hiçbir kümeye dâhil olmayıp dışarıda kalan minimum, maksimum ve ortalama düğüm sayıları görülmektedir.

100 x 100'lük ağ alanında 100 düğümün olduğu durumda (Çizelge 3), ilk düğüm ölümü R_C değeri azaldıkça önce geciktirilmiş; R_C 'nin 80 olduğu noktada maksimum

değerine ulaştıktan sonra R_C 'nin artışı ile yeniden azalmaya başlamıştır. R_C değerinin tüm ağı kapsayacak kadar büyük olması, küme başlarının daha uzak mesafelere yayım paketlerini ulaştırmak zorunda kalmalarına, bu amaçla daha fazla enerji harcamalarına ve dolaylı olarak daha erken düğüm ölümlerine neden olmaktadır. Benzer şekilde düşük R_C değerleri ise daha fazla düğümün dışarıda kalarak hiçbir kümeye katılmamasına neden olmaktadır.



Şekil 4. OMNeT++ üzerinde çalıştırılan 100 düğümlü bir KAA'da düğümlerin yarısının öldüğü anda ağın görüntüsü (Screenshot of a 100 node WSN running on OMNeT++ simulation program at the death of the half node)



Şekil 5. OMNeT++ üzerinde çalıştırılan 100 düğümlü bir KAA'da düğümlerin tamamı öldüğü anda ağın görüntüsü (Screenshot of a 100 node WSN running on OMNeT++ simulation program at the death of the last node)

Çizelge 3. 100 x 100'lük ağ alanında 100 düğüm için ilk, orta ve son düğümlerin öldükleri döngü ile dışarıda kalan minimum, maksimum ve ortalama düğüm sayıları (Minimum, maximum, and average number of nodes that are unclustered and the death round of the first, middle, and last node for a 100 node network with a size of 100 x 100)

| | İlk | Orta | Son | Max | Min | Ort |
|-------------|------|------|------|-----|-----|---------|
| TB-LEACH | 1047 | 1485 | 1881 | 0 | 0 | 0 |
| $R_C = 100$ | 1057 | 1491 | 2015 | 1 | 0 | 0,0015 |
| $R_C = 80$ | 1063 | 1526 | 2150 | 13 | 0 | 0,2419 |
| $R_C = 60$ | 919 | 1538 | 2240 | 23 | 0 | 2,5616 |
| $R_C = 50$ | 611 | 1501 | 2396 | 45 | 0 | 5,6229 |
| $R_C = 30$ | 361 | 1493 | 2538 | 62 | 0 | 16,3656 |

Çizelge 4. 100 x 100'lük ağ alanında 200 düğüm için ilk, orta ve son düğümlerin öldükleri döngü ile dışarıda kalan minimum, maksimum ve ortalama düğüm sayıları (Minimum, maximum, and average number of nodes that are unclustered and the death round of the first, middle, and last node for a 200 node network with a size of 100 x 100)

| | İlk | Orta | Son | Max | Min | Ort |
|-------------|-----|------|------|-----|-----|---------|
| TB-LEACH | 977 | 1514 | 2016 | 0 | 0 | 0 |
| $R_C = 100$ | 977 | 1520 | 2070 | 3 | 0 | 0,0048 |
| $R_C = 80$ | 977 | 1551 | 2108 | 18 | 0 | 0,5797 |
| $R_C = 60$ | 693 | 1542 | 2214 | 57 | 0 | 5,1079 |
| $R_C = 50$ | 496 | 1551 | 2240 | 82 | 0 | 11,5652 |
| $R_C = 30$ | 367 | 1606 | 2432 | 135 | 0 | 35,0329 |

Çizelge 3'te görüldüğü gibi R_C değeri azaldıkça hiçbir kümeye dâhil olamayan düğüm sayısı maksimumda 62, ortalamada 16 değerlerine ulaşmıştır. Dışarıda kalan düğümler, verilerini doğrudan baz istasyonuna iletmek

artması, R_C değerinden bağımsız olarak, daha fazla düğümün dışarıda kalmasına neden olmuştur.

Çizelge 4'te görüldüğü üzere en kötü durumda, tıpkı Çizelge 3'te olduğu gibi R_C değeri en düşük olduğu

Çizelge 5. 200 x 200'lük ağ alanında 100 düğüm için ilk, orta ve son düğümlerin öldükleri döngü ile dışarıda kalan minimum, maksimum ve ortalama düğüm sayıları (Minimum, maximum, and average number of nodes that are unclustered and the death round of the first, middle, and last node for a 100 node network with a size of 200 x 200)

| | İlk | Orta | Son | Max | Min | Ort |
|-------------|-----|------|------|-----|-----|---------|
| TB-LEACH | 424 | 799 | 981 | 0 | 0 | 0 |
| $R_C = 100$ | 124 | 967 | 1721 | 51 | 0 | 3,0314 |
| $R_C = 80$ | 92 | 809 | 1920 | 54 | 0 | 4,8568 |
| $R_C = 60$ | 81 | 510 | 2230 | 66 | 0 | 6,7969 |
| $R_C = 50$ | 58 | 369 | 2332 | 72 | 0 | 8,6214 |
| $R_C = 30$ | 47 | 223 | 2480 | 86 | 0 | 10,4228 |

zorunda kaldıkları için enerjileri daha erken tüketecek ve buna bağlı olarak ilk düğüm ölümleri daha erken döngülerde yaşanacaktır. Orta düğüm ölümünde, ilk düğüm ölümüne benzer bir eğilim görülmekle beraber, ideal R_C değerinin azaldığı ($R_C = 60$) görülmektedir. Son düğüm ölümlerinde ise sonuçlar diğer iki gruptan oldukça farklıdır. Son düğüm ölümü, R_C değeri azaldıkça gecikmektedir. Bunun nedeni düğümlerin ağ yaşam süresinin sonlarına doğru enerjilerinin çoğunu kaybetmeleri sonucunda kümeleme işlemine harcanan enerjinin doğrudan baz istasyonuna ulaşmaya göre avantajını kaybetmesidir.

Çizelge 4 'te görüldüğü üzere 100 x 100'lük ağ alanına 200 düğüm yerleştirildiğinde, 100 düğüm içeren sistemden farklı olarak görülebilecek sonuçlardan en belirginini, ilk düğüm ölümlerinin daha erken; orta ve son düğüm ölümlerinin ise daha ileri döngülerde

durumda, dışarıda kalan düğüm sayısı maksimumda 135'e, ortalamada 35 değerine ulaşmıştır. Daha fazla sayıda düğümün hiçbir kümeye dâhil olamayıp dışarıda kalması, bu düğümlerin enerjilerini daha çabuk tüketmesine ve ilk düğüm ölümünün daha erken bir döngüde yaşanmasına neden olmuştur. Ağdaki düğüm sayısının artması, orta ve son düğüm ölümlerinde, ilk düğüm ölümünden farklı bir etki sergilemiştir. Baz istasyonuna yakınlığından dolayı enerjisini verimli bir şekilde harcayan düğüm sayısının artması, ağ yaşam süresinin uzamasını sağlamıştır.

Çizelge 5'te görüldüğü üzere 100 düğümlü KAA'da ağ alanı 2 katına çıkarıldığında (200 x 200), R_C değerinden bağımsız olarak hem ilk hem de orta ve son düğüm ölümleri Çizelge 3'e göre daha erken döngülerde gerçekleşmiştir. Beklenen bu sonucun nedeni, düğümlerin her durumda daha uzak mesafelerde iletim

Çizelge 6. 200 x 200'lük ağ alanında 200 düğüm için ilk, orta ve son düğümlerin öldükleri döngü ile dışarıda kalan minimum, maksimum ve ortalama düğüm sayıları (Minimum, maximum, and average number of nodes that are unclustered and the death round of the first, middle, and last node for a 200 node network with a size of 200 x 200)

| | İlk | Orta | Son | Max | Min | Ort |
|-------------|-----|------|------|-----|-----|---------|
| TB-LEACH | 483 | 1020 | 1199 | 0 | 0 | 0 |
| $R_C = 100$ | 112 | 1184 | 1690 | 74 | 0 | 6,0000 |
| $R_C = 80$ | 67 | 971 | 1866 | 96 | 0 | 10,0000 |
| $R_C = 60$ | 61 | 610 | 2022 | 115 | 0 | 16,0964 |
| $R_C = 50$ | 56 | 486 | 2282 | 131 | 0 | 17,8234 |
| $R_C = 30$ | 45 | 343 | 2449 | 171 | 0 | 27,3728 |

yaşanmasıdır. Bu sonuçların sebebi, dışarıda kalan düğüm sayılarındaki değişimdir. Düğüm sayısının

yaşam zorunda olmaları ve enerjilerini daha çok harcamalarıdır. Ağ alanının etkisi sadece düğüm

ölümlerinde değil, küme dışında düğümlerde de görülmektedir. 100 x 100'lük alanda dışarıda kalan düğüm sayıları farklı R_C değerlerine göre maksimumda 1 ile 62 arasındayken, 200 x 200'lük alanda bu değerler 51 ve 86'ya ulaşmıştır. Ağ alanının etkisi 200 düğümde de 100 düğüme benzer etkiler göstermektedir (Çizelge 6). İlk düğümde %90'lara, orta düğümde %80'lere ve son düğümde %40 değerine varan oranlarda erken düğüm ölümleri gerçekleşmiştir. 200 x 200'lük ağ alanında R_C 'nin etkisi incelendiğinde hem 100 hem 200 düğüm için ilk düğüm ölümlerinin 100 x 100'lük alandan farklı olarak R_C değeri azaldıkça daima azaldığı görülmektedir. Bu farklılığın nedeni R_C değeri yüksek olsa bile ağ alanının büyüklüğünden dolayı düğümlerin dışarıda kalma oranlarının ve verilerini ilettikleri mesafenin daha fazla olmasıdır.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayan kümeleme tabanlı mimariler, literatürde sıklıkla KAA yapısının kurulmasında tercih edilmektedir. Yapılan çalışmaların bir kısmında kümeleme alanı tüm ağı kapsayacak genişlikte olabilirken, diğer bir kısmında enerji verimliliğini sağlamak amacıyla bu alan sınırlandırılmıştır. Hangi yaklaşımın enerjisi daha verimli kullandığını tespit etmek amacıyla bu çalışmada, farklı ağ parametreleri üzerinden çeşitli benzetimler yapılmış ve ağ yaşam süresi ilk, orta ve son düğümlerin öldüğü döngüler üzerinden analiz edilmiştir.

Gerçekleştirilen ayrıntılı benzetimler sonucunda R_C değerinin artması ile ilk düğüm ölümleri gecikirken, orta ve son düğüm ölümlerinin daha erken yaşandığı; ağ alanının artmasının tüm düğüm ölümlerini daha erken bir döngüye çekerken en yüksek oranda etkiyi ilk düğüm ölümlerinde, ardından orta düğüm ölümlerinde yaptığı; düğüm sayısının artmasının ise ilk düğüm ölümlerini daha erken bir döngüye çekerken orta ve son düğüm ölümleri için gecikme sağladığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçların ışığında bu çalışmanın, gelecekte hem gerçek zamanlı hem de benzetim ortamında tasarlanacak olan kümeleme tabanlı mimarilerde küme kapsama alanının tasarım tercihlerine uygun olarak seçilmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Batra, P. K., & Kant, K., "LEACH-MAC: a new cluster head selection algorithm for Wireless Sensor Networks", *Wireless Networks*, 22(1): 49-60, (2016)
- [2] Jia, D., Zhu, H., Zou, S., & Hu, P., "Dynamic cluster head selection method for wireless sensor network", *IEEE Sensors Journal*, 16(8): 2746-2754, (2016)
- [3] Toklu, S., & Erdem, O. A., "BSC-MAC: Energy efficiency in wireless sensor networks with base station control", *Computer Networks*, 59: 91-100, (2014)
- [4] Toklu, S., & Şimşek, M., "Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Ağ Ömrünü Uzatmak İçin Uygulamaya Özel Uyu-Uyan Stratejisi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(4): 1038-1046, (2018)

- [5] Toklu, S., & Erdem, O. A., "Idle ve Power_Down Güç Durumunun Enerji Başarım Değerlendirmesi", *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 5(3): 35-40, (2012)
- [6] AlSkaif, T., Bellalta, B., Zapata, M. G., & Ordinas, J. M. B., "Energy efficiency of MAC protocols in low data rate wireless multimedia sensor networks: A comparative study", *Ad Hoc Networks*, 56: 141-157, (2017)
- [7] Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., & Balakrishnan, H., "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks", *System sciences, 2000. Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on*. IEEE, (2000)
- [8] Zhang, D. G., Wang, X., Song, X. D., Zhang, T., & Zhu, Y. N., "A new clustering routing method based on PECE for WSN", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 1: 162, (2015)
- [9] Shang, F., "A multi-hop routing algorithm based on integrated metrics for wireless sensor networks", *Applied Mathematics & Information Sciences*, 7(3): 1021, (2013)
- [10] Junping, H., Yuhui, J., & Liang, D., "A time-based cluster-head selection algorithm for LEACH", *Computers and Communications, IEEE Symposium on*, (2008)
- [11] Nayak, P., & Devulapalli, A., "A fuzzy logic-based clustering algorithm for WSN to extend the network lifetime", *IEEE Sensors Journal*, 16,1: 137-144, (2016)
- [12] Sert, S. A., Bağcı, H., & Yazıcı, A., "MOFCA: Multi-objective fuzzy clustering algorithm for wireless sensor networks", *Applied Soft Computing*, 30: 151-165, (2015)
- [13] Kuila, P., & Jana, P. K., "Energy efficient clustering and routing algorithms for wireless sensor networks: Particle swarm optimization approach", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 33: 127-140, (2014)
- [14] Elhabyan, R. S., & Yagoub, M. C., "Two-tier particle swarm optimization protocol for clustering and routing in wireless sensor network", *Journal of Network and Computer Applications*, 52: 116-128, (2015)
- [15] Sevgi, C., & Koçyigit, A., "On determining cluster size of randomly deployed heterogeneous WSNs", *IEEE Communications Letters*, 12: 4, (2008)
- [16] Kumar, V., Dhok, S. B., Tripathi, R., & Tiwari, S., "Cluster size optimization in Gaussian distributed wireless sensor networks", *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, 6(3): 1581-1592, (2014)
- [17] Kumar, V., Dhok, S. B., Tripathi, R., & Tiwari, S., "Cluster size optimisation with Tunable Elfas sensing model for single and multi-hop wireless sensor networks", *International Journal of Electronics*, 104(2): 312-327, (2017)
- [18] Förster, A., Förster, A., & Murphy, A. L., "Optimal cluster sizes for wireless sensor networks: An experimental analysis", *In International conference on ad hoc networks*, 49-63, (2009)
- [19] Afsar, M. M., & Tayarani-N, M. H., "Clustering in sensor networks: A literature survey", *Journal of Network and Computer Applications*, 46: 198-226, (2014)
- [20] Ray, A., & De, D., "Energy efficient clustering protocol based on K-means (EECPK-means)-midpoint algorithm for enhanced network lifetime in wireless sensor network", *IET Wireless Sensor Systems*, 6(6): 181-191, (2016)
- [21] Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., & Balakrishnan, H., "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks", *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 1(4): 660-670, (2002)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Plastik parçalarda bir esneyerek kilitlenen bağlantı modelinin modal analizi

Modal analysis of a snap-fits joint model for plastic parts

Yazar(lar) (Author(s)): Fulya ERDEMİR¹, Murat Tolga OZKAN²

ORCID¹: 0000-0002-1383-6857

ORCID²: 0000-0001-7260-5082

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Erdemir F., Ozkan M. T., “Plastik parçalarda bir esneyerek kilitlenen bağlantı modelinin modal analizi”, Politeknik Dergisi, 22(4): 927-933, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.499235

Plastik Parçalarda Bir Esneyerek Kilitlenen Bağlantı Modelinin Modal Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Fulya ERDEMİR^{1*}, Murat Tolga OZKAN²

¹Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi Türkiye

²Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi Türkiye

(Geliş/Received : 19.12.2018 ; Kabul/Accepted : 03.01.2019)

ÖZ

Karmaşık geometriye sahip enjeksiyon kalıplı plastik parça montajında, kimyasal yapıştırıcı ve vidalama yerine esneyerek kilitlenen bağlantılar (snap-fits) tercih edilmektedir. Bu bağlantıların kullanımı ara yüzey ve ilgili eşleşme kuvvetinin doğru hesaplanmasına dayanmaktadır. Bu çalışma da, kiriş ya da ayaklı diye tarif edilen ayakucunda kilitleme detayı bulunan bir bağlantı elemanının Polilaktik Asit (PLA), Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) ve Polietilen Tereftalat Glikol kopolimer (PET-G) malzemeleri kullanılarak elde edilen modeller için Modal analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Modal analizden elde edilen veriler kullanılarak harmonik cevap analizi yapılmıştır. Sonuçta elde edilen veriler yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Plastik parçalar, esneyerek kilitlenen bağlantı elemanları, modal analiz, harmonik cevap analizi, sonlu elemanlar analizi.

Modal Analysis of a Snap-fits Joint Model for Plastic Parts

ABSTRACT

Snap-fits are preferred when mounting injection-molded plastic parts with complex geometries, locking them in place of chemical adhesives and screws. The use of Snap-fits is based on the accurate calculation of the interface and the associated coupling strength. In this study, a Modal Analysis process was carried out for the products obtained by using Polylactic Acid (PLA), Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and Polyethylene Terephthalate Glycol copolymer (PET-G) materials of a connecting element with locking detail on the movable, which is described as beam or movable. Harmonic Analysis was performed using the data obtained from Modal Analysis. The obtained data were interpreted.

Keywords: Plastic parts, snap-fits, modal analysis, harmonic response analysis, finite element analysis (FEA).

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen teknoloji ve malzemelere kazandırılan teknik özelliklerin iyileştirilmesiyle plastik malzemeler birçok sektörün ham maddesi haline gelmiştir. Plastikler malzemelere olan talep artışı ile birlikte diğer malzemelerle olan bağlantısı da önem kazanmıştır. Plastik bağlantı elemanlarından biri olan esneyerek kilitlenen bağlantı elemanları tasarımları, kolay montaj ve demontaj edilebilir özellikleri, çevre dostu olmaları gibi özelliklerinden dolayı birçok araştırmaya konu olmuştur. Suri ve Luscher, yapısal soyutlama yaklaşımını formüle etmiştir. Esas olarak geçmeli yapının tabanına esneklik eklemek ve yay elemanlarını kullanarak tabanın etkisinin olduğu hipotezini kanıtlamaya çalışmıştır. Test işlemi ardından elde edilen sonuçlardaki doğruluk, taban parçasının sertliğinin modellenmesiyle sağlanmıştır. Böylece snap-fit performansının gerçekçi simülasyonu sağlanarak güvenilirliği artırılmıştır [1]. Ajesh ve arkadaşları ise dizüstü bilgisayarın bir anakartından alınan boyutların referansı ile bir konsol bağlantı parçası tasarlamıştır.

Tasarlanan bağlantı parçasına ABS+PC, POLYSULPHONE, RADEL-r ve PETG malzemesi kullanılarak malzemenin tasarım üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tasarlanan model için ANSYS ortamında malzemenin kesme kuvveti ve gerilme mukavemeti doğrulanmıştır [2]. Esneyerek Kilitlenen Bağlantıların kullanımı ara yüzey ve ilgili eşleşme kuvvetinin doğru hesaplanmasına dayanır. Eşleşme kuvveti ara kesişim noktasıyla orantılıdır. Plastik parça boyutsal hataya çok duyarlı olan ara kesişim nokta oranıdır. Yetersiz girişim gevşek montaj ile sonuçlanırken, girişimin aşırı olması montajı engelleyerek ince duvarlı plastik parçalara zarar verebilir. Niteliksiz girişim olasılığı otomobil ve elektronik uygulamadaki yüksek kaliteli Esneyerek Kilitlenen Bağlantı uygulamalarında zarara neden olur. Chen ve Lan, çalışmalarında hassas ara kesim noktasının gereksinimini azaltmak ve montaj sağlamlığını iyileştirmek için sabit kuvvetli bir Esneyerek Kilitlenen Bağlantı tasarımı (belirsiz kesişim noktalarının düzenleyici kuvvet ile bakılan) sunmuştur. En sabit eşleşme kuvvetini üreten bağlantı konfigürasyonlarını bulmak için bir tasarım formülasyonu gerçekleştirmiştir. Resimli simülasyon ve deneyler, sabit kuvvetli geçme uyumunun tipik bağlantı eşleşmelerinden daha az kuvvet

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : erdemirfulya@gmail.com

ile olduğunu göstermiştir. Belirsiz eşleşme kuvveti kesin girişim gerektirmeden minimize edilmiş, var olan Esneyerek Kilitlenen Bağlantı uygulamalarında alternatif sağlamlasını düşünmüşlerdir [3]. Kulkarni ve arkadaşları, RADIOSS, HyperCrash ve diğer HyperWorks araçlarını kullanarak üretim ve servis kolaylığı için sıkı tasarım gereksinimlerini karşılayarak, tipik bir plastik esneyerek kilitlenen bağlantı tasarımı için sistematik yaklaşımı göstermiştir. Araştırmadan, yüksek gerilimli konsantrasyon alanlarının, bloğun rampa açısına, kanat kalınlığına ve keskin köşelere duyarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu gibi problem alanları, sırasıyla Mating (Birleşme) ve Base (Taban) kısımlarında uygun açılarla çentikler vasıtasıyla geliştirilmektedir. Tasarım değişiklikleri imalat ve servis kolaylığı kriterlerine göre yapılmalıdır. İtme koşulunun önce ve ardından çekme koşulunun karşılanması gerekli değildir. Tasarımın hedefleri karşılamak için 4'ten fazla tekrar etmesi durumunda, geçmeli tasarımın hem itme ve çekme için çapraz kontrol edilmesi tavsiye edilir [4].

Esneyerek kilitlenen bağlantılar montaj/demontaj süresi, üretim maliyeti ve parça sayısını azaltması gibi özelliklerinden ötürü geleneksel montaj yöntemlerine göre daha sık tercih edilir. Tipik bir esneyerek kilitlenen bağlantı simülasyonu iki kritik adım içerir; temas algılama ve doğrusal olmayan deformasyon analizi. Biri iki aşamayı simüle etmek için standart 3D Sonlu Eleman Analizi (FEA) ve 3D kontakt detektörlere dayanır. Ancak, esneyerek kilitlenen bağlantılar kırılgandır, büyük deformasyon analizleri için ışın analizleri verimlidir, fakat temas tespiti zorluklar doğurabilir. Ayrıca karmaşık snap parçalarının 1D formülasyonu için enine kesit özelliklerinin çıkarılması kolay değildir. Jorabchi ve Suresh, "Her iki dünyanın en iyisi" dedikleri doğrusal olmayan boyut küçültme yöntemi sunmuştur. Temas tespiti için 3D bir model kullanılmıştır. Önerilen yöntemde deformasyon analizini hızlandırmak için cebirsel bir işlem aracılığıyla üç boyutlu modelin bir boyutlu ışın modeli oluşturulmuştur. Optimizasyon çalışmaları ve nümerik deneylerle doğrularak üç boyutlu simülasyonun genelliğini ve bir boyutlu hesaplamaların verimliliğini sunmuştur [5]. Son on yılda yapılan çalışmalar da akıllı materyal kullanılarak aktif demontaj incelenmiş, maliyet, malzeme özellikleri ve sınırlı tedarik nedeniyle geniş çapta uygulanmadığı görülmüştür. He ve arkadaşları, Şekil Bellek Polimeri (SMP) ile harekete geçirilen içi boş geçmeli bir tasarım yapmış ve gelecekteki bazı uygulamalar için kurallar belirlemiştir. Tasarım parametreleri ile iki ana birleşim arasındaki korelasyon, ana tasarımın hedefleri, maksimum sapma ve eşleşme gücü, FEA yazılımı kullanılarak analiz etmiştir. Bu tasarımın olası alternatiflerden biri olduğu, böylece akıllı malzeme kullanımının azalacağı ve malzemenin mekanik özelliklerinin artırılacağı düşünülmektedir [6]. Geçmeli bağlantı parçaları mevcut olan en ucuz ve hızlı bağlantılardan biridir. Ancak, eklemelerin geometrik karmaşıklığı ve sınırlamaları nedeniyle enjeksiyon kalıplama, neredeyse büyük ölçekli imal edilmiş

ürünlerde kullanılmaktadır. Eklemeli imalat ise neredeyse sınırsız imalat karmaşıklığı ile küçük ve orta ölçekli son kullanıcı ürünlerini sunmaktadır. Klahn ve arkadaşları, eklemeli imalat sürecindeki mevcut tasarım klavuzlarında ilkeler değişmeden kalırken, ürün ve kullanıcı entegrasyonunu geliştirmek için eklemeli imalatın avantajları getirilerek ergiyik biriktirme yöntemi ve seçici lazer sinterleme yöntemi ile esneyerek kilitlenen bağlantı parça bulunduran bir kapak tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sonuçta üretimdeki kalıp maliyetinden dolayı eklemeli imalat yönteminin daha avantajlı olduğu gösterilmiş ve yeni tasarımcılara esneyerek kilitlenen bağlantı tasarımında yeni fonksiyonlar ekleyebilme işleminin yolu açılmıştır [7].

Modal analiz veya mod-süperpozisyon yöntemi, yer değiştirme modellerini karakterize etmek için serbest titreşim modu şekillerini değerlendiren ve üst üste bindiren doğrusal bir dinamik yanıt prosedürüdür. Mod şekilleri, bir yapının doğal olarak yer değiştireceği konfigürasyonları tanımlar. Çalışma şartlarında modal analiz herhangi bir kuvvete gerek kalmadan modal parametreleri bulmak için cevap (ivme) parametre verileri kullanılarak gerçekleştirilen bir işlemdir. İşlemin bu şekilde olması test düzeneği kurulumunda zaman kısaltmaktadır. Kuyumcuoğlu tez çalışmasında, çalışma şartlarındaki modal analiz için Frekans Alanında Ayrıklaştırma (FAA) yöntemini kullanarak bir sistemin çalışma şartları altındaki titreşimlerini kullanarak sisteme ait modal parametreleri belirleme çalışmıştır. Frekans Alanında Ayrıklaştırma yönteminin uygulanabilirliği sayısal analizler ve ardından da deneysel çalışmalar ile sınanmıştır. Sayısal analizlerden ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, çalışma ortamında modal analiz yönteminin kabul ettiği varsayımların geçerli olduğu ortamların yaratılması durumunda uygulanabilir olduğunu göstermiştir [8]. Reddy ve arkadaşları, CATIA ortamında çizilen bir yaprak yay modelinin ANSYS 18.0 kullanılarak statik ve dinamik analizlerini gerçekleştirmiştir. Analitik yöntemi, aracın maksimum yük yükünü ve yaprak yayının doğal frekanslarını uyarma frekansı ile karşılaştırmak için kullanmış, statik analiz yapılarak ANSYS sonuçları ile doğrulamıştır. Tasarlanan modelin doğal frekansını ve mod şekillerini belirlemek için Modal Analiz yapılmıştır. Bu doğal frekanslar, aracın farklı hızlarındaki uyarım frekanslarıyla, yol düzensizliğinin çeşitli genişlikleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçta bu uyarım frekansları analitik sonuçlarla doğrulanmıştır [9]. Hügül, çalışmasında hareketli tekil yüke maruz kalan kiriş ve kafes yapıların dinamik cevaplarını incelemiştir. Nümerik analiz olarak Newmark Metodu ve FEA kullanarak kafes tipi yapılarda kiriş ve kolonların birleşme noktalarına bağlanan yayların esnekliğinin dinamik harekete etkilerini ve yükün hareket hızının dinamik büyütme faktörüne etkisini incelemiştir. Dinamik analizleri MATLAB kodları kullanarak gerçekleştirmiş ve ANSYS sonuçları ile kıyaslayarak uyumluluğunu göstermiştir [10]. Yu ve arkadaşları, yağmurlu alanlarda kullanılan bir hendek

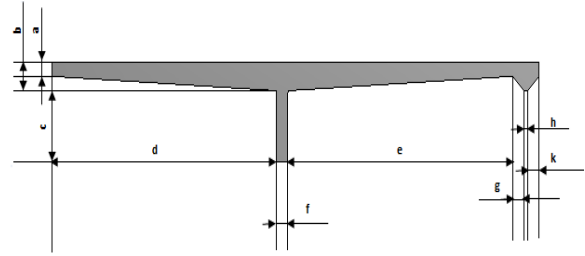
açma cihazını modellemiştir. Çalışma sırasında titreşim frekansı 8-9 Hz olarak ölçülen cihazın ANSYS ortamında modal analizi gerçekleştirilerek doğal frekans ve harmonik cevabını elde etmiştir. Analiz sonrasında makinenin titreşim koşulları altındayken çok küçük miktarda gerilme ve deformasyona uğradığının fakat bu durumun makinenin güç ve stabilitesini etkilemeyeceği sonucuna varılmıştır [11]. Özgener, çalışmada taşıt üzerindeki titreşimlerin olumsuz etkilerini araştırmak adına kamyon titreşim davranışları ve şasiye olan etkilerini incelemiştir. Bir kamyon kabini tasarlamış ve tasarlanan modelin kritik özelliklerini belirlemiştir. ANSYS 5.7 yazılımını kullanarak analiz işlemi gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışma sonucunda iyileştirilmeler için gerekli konstrüktif çalışma önerilerinde bulunmuştur [12]. Shamshiri ve Ismail, çalışmalarında çiftlik traktörlerinde kullanılan iki dereceli bir serbest süspansiyon sisteminin modellenmesi ve analiz edilmesi için sayısal bir araç sunmuştur. Karşılık gelen denklem sistemlerini çözmek için problemi formüle etmek ve traktör arka aks süspansiyonunun doğal frekanslarını ve modlarını elde etmek için ise dinamik modal genişleme metodu ve matris transformasyon tekniğini kullanmıştır. Galerkin metodu kullanarak Modal Analiz işlemi gerçekleştirmiştir. Son olarak da sistemin kararlılığının beklendiği sönümlenen durum için, sayısal sonuçları Lyapunov kararlılık teoremi ile doğrulamıştır [13]. Işık, talaşlı imalatta kullanılan kesici takımların dinamik ve statik analizlerini sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirmiştir. WC kesici takım (DNMG 150608) ve soğuk iş takım çeliği AISI O1 (60 HRC) ile yapılan deneylerde ölçülen kesme kuvvetlerini harmonik analizde giriş zorlama değerleri olarak modele uygulamıştır. Modal analiz işlemi gerçekleştirilerek takımın doğal frekansını ve mod şekillerini belirlemiştir. Gerçekleştirilen harmonik analiz sonucu kesici takımın en fazla hangi noktalardan zorlandığı ve kırılma anında gerilme ve yer değiştirme değerlerine hangi noktalarda ulaştığı belirlenmiştir [14].

Araştırmalar sonucunda, esneyerek kilitleme bağlantılar için yapılan modal analize raslanmamıştır. Bu bağlantılar, otomotiv sektörü gibi birçok titreşimli ortamlarda kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışma da, esneyerek kilitlenen bağlantılardan kiriş ya da ayaklı diye tarif edilen ayakucunda kilitleme detayı bulunan bir bağlantı modelinin titreşimli koşullardaki tepkileri incelenmiştir. Yapılan analiz PLA, ABS ve PET-G olmak üzere 3 çeşit malzeme kullanılarak oluşturulan bağlantı modeli için gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışma kapsamında, kiriş ya da ayaklı diye tarif edilen ayak ucunda kilitleme detayı bulunan bir bağlantı modelinin boyutları parametrik olarak değiştirilerek katı model haline getirilmiştir. Parametrik değerler ise belli

bir orana sahip olacak şekilde seçilmiştir. Çizilen modele ait parametrik boyutlar Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Profile ait ölçülendirme bilgilerinin belirlenmesi (Identifying the dimensioning information of the profile)

Şekil 1’de gösterilen parametler sırasıyla a=tırnak kalınlığı, b=tırnak bağlantı kalınlığı, c=bağlantı yüksekliği, d=bağlantı yerine uzaklık, e= bağlantı arkası boy, f=bağlantı kalınlığı, g=iç tırnak boyu, h=kuvvet uygulama alan genişliği, k= dış tırnak boyu parametrelerini göstermektedir.

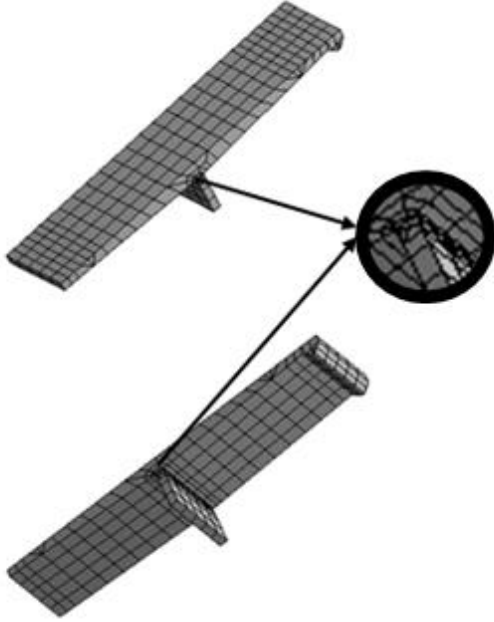


Şekil 2. Katı modelin oluşturulması (izometrik görünüş) (Formation of solid model (isometric view))

Çizelge 1. Malzeme özellik çizelgesi (Material property chart)

| | Yoğunluk (kg/m ³) | Young Modülü (GPa) | Gerilme Direnci (MPa) | Uzama (%) | Poisson Oranı |
|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------|------------------|
| P L A | 1,24e3- 1,27e3 | 3,3-3,6 | 47-70 | 2,5-6 | 0,38-0,4 |
| A B S | 1,02e3- 1,08e3 | 2-2,9 | 30-50 | 20-100 | 0,394- 0,422 |
| P E T- G | 1,26e3- 1,28e3 | 2,01-2,11 | 60-66 | 102- 118 | 0,395- 0,411 |

Katı modelin tanımlanan parametrelerine bağlı olarak tüm varyasyonları Şekil 2’de görüldüğü gibi ANSYS Design Modeller programında hazırlanmıştır. Çizelge 1’de ise özellikleri verilen malzemeler parametrik olarak atanmıştır. Oluşturulan modelin analiz işleminden önce Şekil 3’de gösterildiği gibi mesh optimizasyonu işlemi gerçekleştirilmiştir.

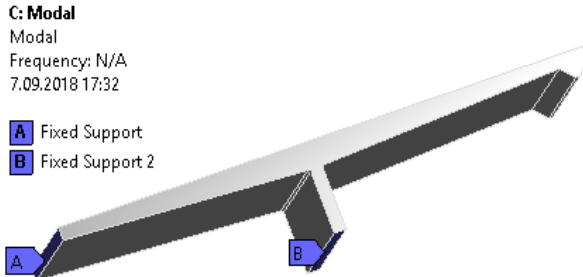


Şekil 3. Mesh optimizasyonu (Mesh Optimization)

3. MODAL ANALİZ (MODAL ANALYSIS)

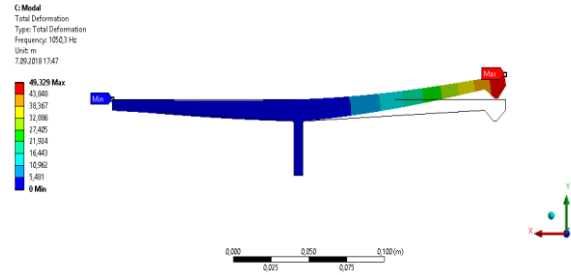
Yapının olası titreşim durumlarında hangi şekillerde titreşeceğini fikrini verecek olan mod durumlarının tespit edilmesi ve yapının doğal frekans değerinin belirlenmesini sağlayan dinamik analizin ilk aşamasıdır. Malzeme özelliklerine bağlı olarak elde edilen modal parametreler değişmektedir.

Mesh optimizasyonu gerçekleştirilen esneyerek kilitlenen bağlantının sınır koşulları Şekil 4’de gösterildiği gibi verilmiştir.

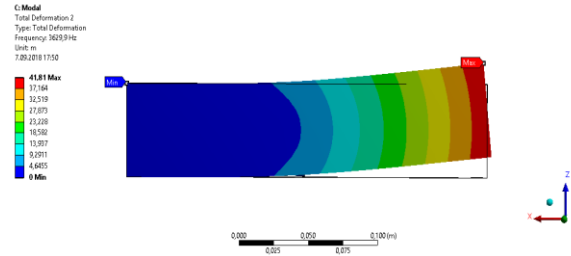


Şekil 4. Modele ait modal analiz sınır koşullarının gösterimi (Boundary conditions of the model representation of the modal analysis)

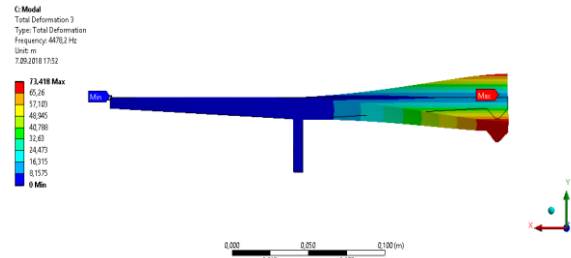
Sınır koşulları belirlenen modelin modal analizi ANSYS ortamında gerçekleştirilmiştir. Mod olarak 10 mod seçilmiştir. Örnek olarak PLA malzemesi atanmasıyla elde edilen deformasyon görüntüleri Şekil 5-14 arasında gösterilmektedir.



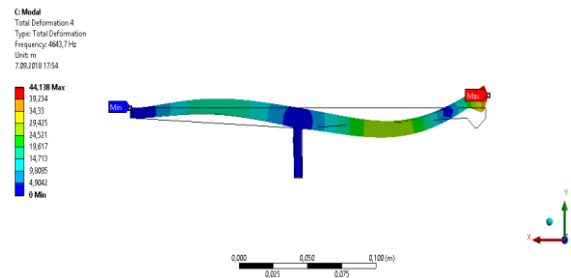
Şekil 5. Mod 1 için deformasyon gösterimi (Deformation representation for Mode 1)



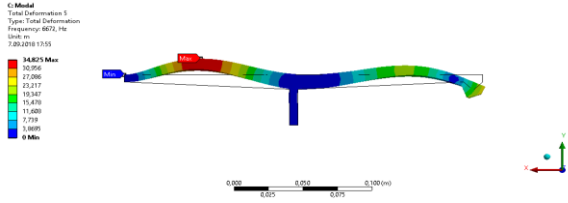
Şekil 6. Mod 2 için deformasyon gösterimi (Deformation representation for Mode 2)



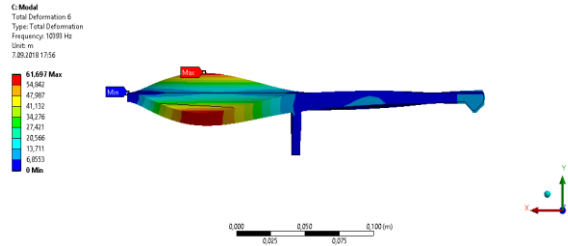
Şekil 7. Mod 3 için deformasyon gösterimi (Deformation representation for Mode 3)



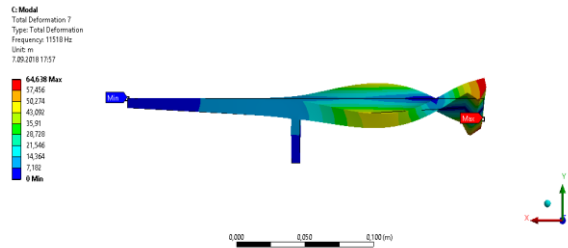
Şekil 8. Mod 4 için deformasyon gösterimi (Deformation representation for Mode 4)



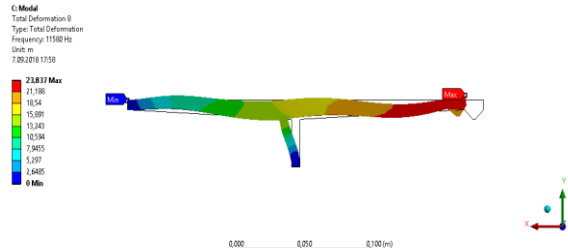
Şekil 9. Mod 5 için deformasyon gösterimi (Deformation representation for Mode 5)



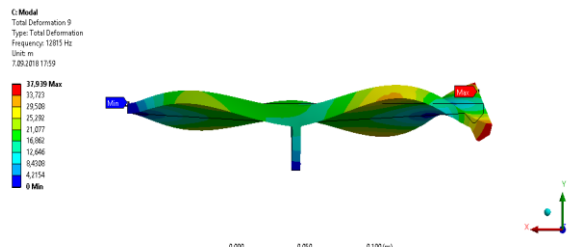
Şekil 10. Mod 6 için deformasyon gösterimi (Deformation representation for Mode 6)



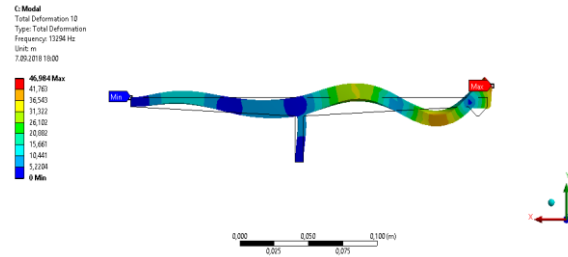
Şekil 11. Mod 7 için deformasyon gösterimi (Deformation representation for Mode 7)



Şekil 12. Mod 8 için deformasyon gösterimi (Deformation representation for Mode 8)



Şekil 13. Mod 9 için deformasyon gösterimi (Deformation representation for Mode 9)



Şekil 14. Mod 10 için deformasyon gösterimi (Deformation representation for Mode 10)

4. HARMONİK CEVAP ANALİZİ (HARMONIC RESPONSE ANALYSIS)

Harmonik cevap analizi belirli bir noktadan ve belirli bir frekansta yapıyı zorlayarak model üzerindeki bu noktaların uygulanan kuvvetlere karşı tepkilerini belirlemektedir.

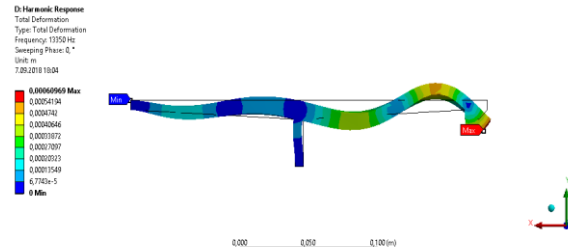
Modal analiz sonuçları harmonik analiz için gereken çeşitli faktörleri ve nedenleri belirlemek için kullanılır. Bu sebeple modal analiz harmonik analizden önce yapılır.

Modal analiz ile frekans değerleri belirlendikten sonra Şekil 15’de gösterilen sınır koşulları eklenerek harmonik analiz yapılmıştır.



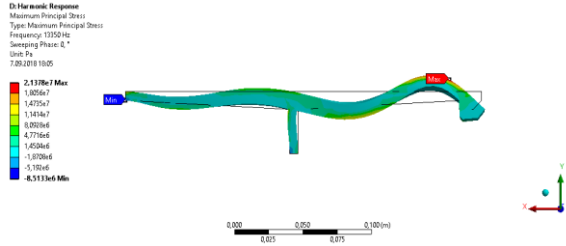
Şekil 15. Modele ait harmonik cevap analiz sınır koşullarının gösterimi (Representation of the harmonic response analysis boundary conditions of Model)

Uygulanan kuvvet kaşısında oluşan toplam deformasyon Şekil 16’da gösterilmektedir.



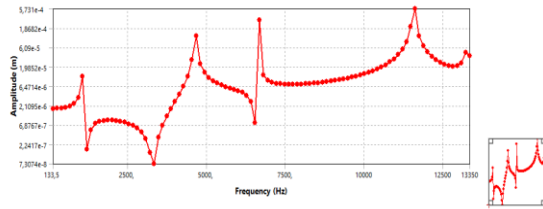
Şekil 16. Modele ait harmonik cevap analizinde oluşan toplam deformasyon gösterimi (Total deformation in harmonic response analysis of the model)

Analiz sonucu elde edilen maksimum asal gerilme 13350 Hz için $2,1378e7$ Pa olarak elde edilmiştir. Elde edilen analiz sonucu Şekil 17’de gösterilmektedir.

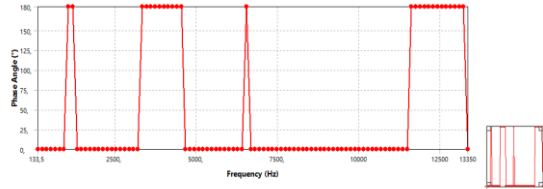


Şekil 17. Modele ait harmonik cevap analizinde oluşan maksimum asal gerilme sonucu (Maximum principal stress result in harmonic response analysis)

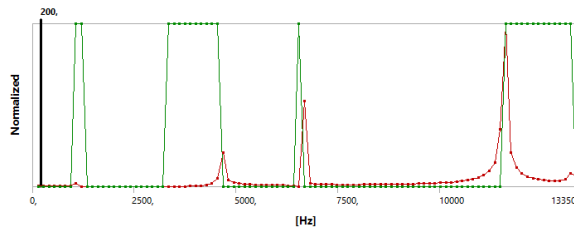
PLA malzemesi seçilerek elde edilen analiz sonuçlarına göre oluşan doğal frekans- genlik grafiği Şekil 18’de, faz açısı – frekans grafiği Şekil 19’da ve normalize-frekans grafiği Şekil 20’de verilmiştir. Esneyerek kilitleme bağlantı elemanı için yukarı da gösterilen analiz sonuçları parametre malzemesi olarak ABS ve PET-G seçilerek tek tek elde edilmiştir.



Şekil 18. Modele ait genlik-frekans grafiği (Amplitude-frequency graph of the model)



Şekil 19. Modele ait faz açısı-frekans grafiği (Phase angle-frequency graph of the model)



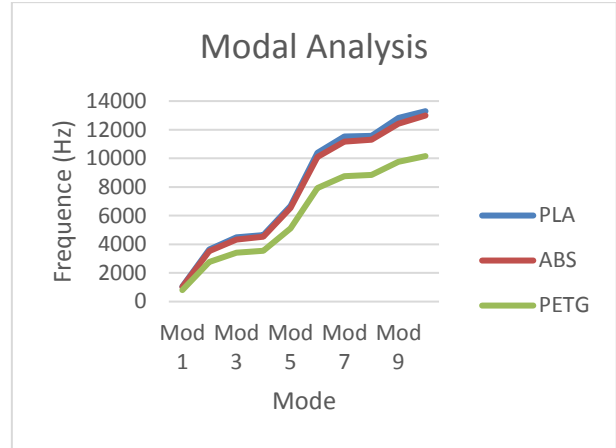
Şekil 20. Modele ait normalize-frekans grafiği (Model normalized-frequency graph)

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

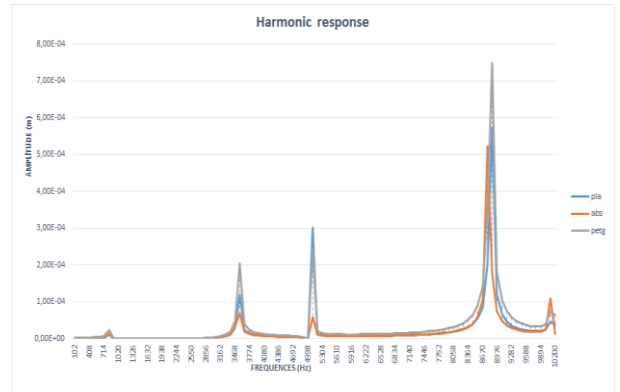
Bu çalışmada, kiriş ya da ayaklı diye tarif edilen ayakucunda kilitleme detayı bulunan bir bağlantı elemanının boyutları parametrik olarak değiştirilerek katı model haline getirilmiştir. Elde edilen modelin ANSYS ortamında modal analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Modal analizden elde edilen verilerin kullanılmasıyla harmonik cevap analizi gerçekleştirilmiştir. PLA, ABS

ve PET-G olmak üzere üç ayrı malzeme için işlem parametreleri tekrarlanmıştır.

Modal analiz sonucu elde edilen frekans ve mod değerlerinin üç ayrı malzeme için elde edilen grafik Şekil 21’de gösterilmiştir. Şekil 21’de görüldüğü gibi PLA ve ABS malzemeleri için birbirine çok yakın frekans değerleri elde edilirken PET-G için elde edilen frekans değerleri daha düşük olmuştur.



Şekil 21. Modal analiz sonucu PLA, ABS ve PET-G için elde edilen frekans-mod grafikleri (Modal analysis results obtained from PLA, ABS and PETG for frequency-mode graphs)



Şekil 22. Modal analiz sonucu PLA, ABS ve PET-G için elde edilen frekans-genlik grafikleri (Modal analysis result obtained for PLA, ABS and PETG frequency-amplitude graphics)

Çizelge 2. Malzemelere göre genlik-frekans değerleri (Amplitude-frequency values according to materials)

| | | PLA | ABS | PET-G |
|--------------|-----|----------|----------|----------|
| Genlik (m) | Min | 1,78E-06 | 1,75E-06 | 3,02E-06 |
| | Max | 3,81E-05 | 1,31E-05 | 6,34E-05 |
| Frekans (Hz) | Min | 133,5 | 131 | 102 |
| | Max | 13350 | 13100 | 10200 |

Modal analiz ile elde edilen frekans değerleri kullanılarak harmonik cevap analizi yapılan bağlantı elemanının PLA, ABS ve PET-G için elde edilen harmonik analiz sonuçlarına ait grafik Şekil 22’de gösterilmektedir. Çizelge 2’de maksimum ve minimum değerler ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu sonuçlara göre, keskin tepe noktalarının olduğu frekans değerleri rezonans durumunun olduğunu göstermektedir. ABS malzemesi bu frekans değerlerinde daha düşük ve geniş olması ile diğer iki malzemeye göre yüksek sönümleme özelliği göstermektedir.

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, bir esneyerek kilitlenen bağlantı modelinin farklı frekans ve mod değerlerindeki modal ve harmonik cevap analizleri gerçekleştirilmiştir. Esneyerek kilitlenen bağlantılarda birbirini tutan makine ara parçalarının, özellikle malzeme olarak plastik ve türevlerinden imal edilmiş olması, bağlantının kararlılığını etkilemektedir. Çalışan tüm makine elemanlarında bir titreşim söz konusudur. Çalışma şartlarında oluşan titreşimin, bağlantının sağlamlığını veya kendi kendine çözülebilmek özelliklerini ortaya çıkartılması amaçlanmıştır. Bu amaçla piyasada en fazla kullanılan 3 farklı malzeme (PLA, ABS ve PET-G) türü için kiriş tipi bir esneyerek kilitlenen bağlantı modelinin Modal ve Harmonik cevap analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece malzeme tipine bağlı olarak, aynı boyut ve şekilde üretilecek tırnaklı bağlantıların güvenilirliği belirlenmiştir. Tasarımı yapılan bağlantı elemanı için belirlenen çalışma şartlarında üç noktada rezonans durumuna geçtiği görülmüştür. Yani bu frekans aralıklarında bağlantı çözülme eğiliminde olmaktadır. Aynı parça için kullanılan malzemeler arasında ABS malzemesinin bu rezonans durumunda en yüksek sönümleme yaptığı gözlemlenmiştir. Güvenirlilik açısından ABS malzeme seçilerek yapılan tasarım daha avantajlı olacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Suri G., and Luscher A., F., “Structural Abstraction in Snap-fit Analysis”, *Journal of Mechanical Design*, 122, 395-402, (2000).
- [2] Ajesh P., Bhadalkar A., Warghane R., Deokar S., “Design and Analysis of Snap Fit Joint with Design Calculator”, *International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering (ICIIME 2017)*, 5, 644-649, (2017).
- [3] Yi-Ho Chen and Chao-Chieh Lan, “Design of a constant-force snap-fit mechanism for minimal mating uncertainty”, *Mechanism and Machine Theory*, 55, 34–50, (2012).
- [4] Kulkarni V., Musale G., and Vallurupalli S., “Effective Snap-Fit Design Using RADIOSS”, *Tata Technologies, Simulation Driven Innovation*, 1-7, (2011).
- [5] Jorabchi K., and Suresh K., “Nonlinear Algebraic Reduction for Snap-Fit Simulation”, *Journal of Mechanical Design*, 131, 061004-1- 061004-8, (2009).
- [6] Bang He, Hua Li , and Kai Jin “Shape memory polymer actuated hollow snap-fit design analysis”, *Materials and Design*, 47, 539–550, (2013).
- [7] Klahn C., Singer D., and Meboldt M., “Design Guidelines for Additive Manufactured Snap-Fit Joints”, *Procedia CIRP*, 50, 264 – 269, (2016).
- [8] Kuyumcuoğlu A., “Çalışma Şartlarında Modal Analiz” *Yüksek Lisans*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2008).
- [9] SubbaReddy J., Bhavani M., Kartheek G., and Venkata Somi Reddy J., “Influence Of Parameters On Safe Design Of Leaf Spring For Static And Dynamic Loading Using Finite Element Analysis”, *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 5, 505-519, (2018).
- [10] Hügül S., “Vibration Analysis Of Systems Subjected To Moving Loads By Using The Finite Element Method”, *Yüksek Lisans*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2005).
- [11] Yu Y., Zhang S., He Li, Wang X., and Tang Y., “ Modal and Harmonic Response Analysis of Key Components of Ditch device Based on ANSYS”, *Procedia Engineering*, 174, 956 – 964, (2017).
- [12] Özgener L., “Bir Kamyon Kabininde Yol Düzgünsüzlükleri Sonucu Oluşan Titreşiminin Bilgisayar Yardımıyla Modellenmesi Analizinin Yapılması Ve Konstrüktif Önlemlerinin Alınması”, *Yüksek Lisans*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2002).
- [13] Shamshiri R., and Wan Ishak Wan Ismail, “ Implementation of Galerkin’s Method and Modal Analysis for Unforced Vibration Response of a Tractor Suspension Model ”, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(1): 49-55, (2014).
- [14] Işık Y., “Talaşlı İmalatta Kesici Takımların Kırılma Öncesi Davranışlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 9(1): 103-110, (2004).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Functionalized multi-walled carbon nanotubes and micro cellulose reinforced poly (vinyl alcohol) hybrid composite films: characterization and reprocessing performance

Fonksiyonel çok duvarlı karbon nanotüp ve mikro selüloz takviyeli poli (vinil alkol) hibrit kompozit filmler: karakterizasyonu ve yeniden işleme performansı

Yazar(lar)(Author(s)): Umit HUNER

ORCID : 0000-0002-4955-3824

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article):Huner U., “Functionalized multi-walled carbon nanotubes and micro cellulose reinforced poly (vinyl alcohol) hybrid composite films: characterization and reprocessing performance”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 935-945, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.443305

Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes and Micro Cellulose Reinforced Poly (Vinyl Alcohol) Hybrid Composite Films: Characterization and Reprocessing Performance

Araştırma Makalesi / Research Article

Umit HUNER*

Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Trakya University, Turkey

(Geliş/Received: 12.07.2018 ; Kabul/Accepted : 03.01.2019)

ABSTRACT

The aim of this research paper was to investigate the synergetic effect of micro cellulose and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) combination on physicochemical, mechanical and reprocessing performance of Poly (Vinyl Alcohol) hybrid composite films. The hybrid composite films production was carried out by the solution casting method, and the reprocessed films were produced using defective (torn, faulty) films from primary production by the same method. The combined use of MWCNTs and micro cellulose improved the hydrophobicity approximately 85% in ratio. After the reprocessing, decreased intensities of the peaks in the FTIR and Raman results confirmed the reduced molecular interaction between all components of the hybrid composite film, moreover, SEM and TEM revealed the negative defects such as agglomeration which caused mechanical strength decrease. The tensile strength of PVA hybrid composite films loaded cellulose/MWCNTs, reached 97 MPa strength value and elongation at break decreased to 33% according to the neat PVA film. The study results revealed that hybridization had a remarkable impact on improving characteristic properties of composite films and reprocessing process might have been compatible with solution casting method.

Keywords: Multi-walled carbon nanotubes, micro cellulose, PVA, hybrid, composite film.

Fonksiyonel Çok Duvarlı Karbon Nanotüp ve Mikro Selüloz Takviyeli Poli (Vinil Alkol) Hibrit Kompozit Filmler: Karakterizasyonu ve Yeniden İşlenme Performansı

ÖZ

Bu araştırma çalışmasının amacı, mikro selüloz ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNTs) kombinasyonunun, Poly (Vinyl Alcohol) hibrit kompozit filmlerin fizikokimyasal, mekanik ve yeniden işleme performansları üzerindeki sinerjik etkisini araştırmaktır. Hibrit kompozit filmlerin üretimi, çözelti döküm yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve yeniden işlenmiş filmler, aynı yöntemle birincil üretimden kaynaklanan kusurlu (yırtık, hatalı) filmler kullanılarak üretilmiştir. MWCNT'lerin ve mikro selülozun birleşik kullanımı hidrofobikliği yaklaşık olarak% 85 oranında arttırdı. Yeniden işleme tabi tutulduktan sonra, FTIR ve Raman'daki tepe noktalarının azalan yoğunlukları, karma kompozit filmin tüm bileşenleri arasındaki azalmış moleküler etkileşimin, ayrıca SEM ve TEM'in mekanik mukavemet azalmasına neden olan topraklanma gibi negatif kusurları ortaya çıkardığını doğruladı. Selüloz / MWCNT takviyeli PVA hibrit kompozit filmlerin gerilme mukavemeti, 97 MPa kuvvet değerine ulaşmış ve kopma uzaması, saf PVA filmine göre% 33'e düşmüştür. Çalışma sonuçları, hibridizasyonun kompozit filmlerin karakteristik özelliklerini iyileştirme konusunda dikkate değer bir etkisi olduğunu ve yeniden işleme sürecinin çözelti döküm yöntemiyle uyumlu olabileceğini ortaya koydu.

Anahtar Kelimeler: Çok duvarlı karbon nanotüp, mikro selüloz, PVA, hibrit, kompozit film.

1. INTRODUCTION

In the last decades, nanotechnology is an engineering field which offers much use in the novel multifunctional materials with improved properties. In this context, the use of carbon nanotubes, a nanotechnology product with unique atomic and mechanical properties, has continued

to be an attractive field of research. Even though nano-reinforcements offer attractive properties, they cannot meet all the needs of the composite structure they are embedded. There are some lacks about adhesion, load transfer or other major requirements between nano-reinforcement and large-scale matrix. If the advantages of nanotechnology and polymer matrix are brought together in a hybrid composition, they can eliminate the deficiencies of the new material [1-4].

*Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-posta : umithuner@trakya.edu.tr

Poly (vinyl alcohol) (PVA) is a useful water-soluble, non-toxic, transparent synthetic polymer which has been widely studied and applied in the form of fiber, film, and gel [2,5–7]. PVA has a strong hydrophilic structure and hydrogen bonding character; thus, it is able to form thin-film or membrane [6,8]. However, PVA has poor mechanical performance which may restrict the PVA film in the heavy-duty applications. To remedy this deficiency, various reinforcement materials have been incorporated into PVA matrix to provide the necessary change in the physical and mechanical properties of PVA film and composites [5,9,10]. Synthetic multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs), which exhibits superior physical and mechanical properties as well as cellulose derived from sustainable plant-based raw materials, is at the forefront in many reinforcing applications [4].

Considering the structural changes, it is well known that micro-nano combinations give superior mechanical properties to the polymer matrix due to their distribution, aspect ratio and orientation. The effect of micro-cellulose or multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties of PVA composites has been studied, previously. Incorporating of cellulose make the polymer matrix like PVA stronger and well-ordered internal structure and this structure exhibits good mechanical performance due to good load transfer mechanism. In studies examining the impact of the contribution of micro-cellulose, Tanpichai et al. [4] investigated micro-fibrillated cellulose reinforced PVA. They observed an increase in both the tensile strength and modulus of the composites was observed for up to 3 wt % fibril reinforcements. In addition, focusing on only the type of reinforcement makes it difficult to clearly understand the results represented in the final composite product. It worth noting that the production conditions also impact the final product structure from the molecular level to the macro properties. Peng et al. [11] reported an improvement in tensile properties (i.e., ultimate strength and elastic modulus) which depended on short cellulose nanofibrils loading, PVA crystal orientation and draw ratio (hot drawn) in their study. Overcoming problems such as homogeneous dispersion or agglomeration in processes using nanoscale reinforcements cause significant changes in the whole composite structure. Mallakpour et al. [5] reported that l-Phenylalanine amino acid functionalized MWCNTs showed better dispersion

in water and improved mechanical and physical properties were also achieved on PVA composite film. The purpose of using hybrid composition in composite production is to reflect the interactions of the different characteristic reinforcements and their different responses to external loading in the composite structure, as improved properties to the whole structure. The research of Montes et al. [3] revealed that the use of cellulose nano-crystal-stabilized graphene improved the tensile strength and Young's modulus about 20% and 50%, respectively, compared with neat PVA. The overall research results still need in-depth data about composite structures consist of a hybrid combination such as micro cellulose and multi-walled carbon nanotubes.

This study reports an investigation about a hybrid composite film which includes nano and micro-sized reinforcements in its structure. Besides, another goal of this study was to expose the defective (torn, faulty) films (from the primary production) to the reprocessing with same parameters and to detect the molecular, physical and mechanical changes in the reprocessed hybrid composite films. The physical (hydrophily) and mechanical properties were determined by the means of contact angle measurement, UV-Visibility, and tensile test. The scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) were used to scan the morphology of composites. And the chemical structures of hybrid composite films were identified by an ATR-Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and Raman spectroscopy.

2. MATERIAL and METHOD

2.1. Materials

Micro cellulose (Arbocel) was supplied from J. Rettenmaier & Söhne GmbH + CO Germany. The fiber length of approximately 90% of cellulose content is 50 μm , its fiber thickness is 35 μm , and bulk density is 70 g l⁻¹. Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs, purity > 95 %) produced by chemical vapor deposition (CVD) were purchased from Joyful Grow (Shanghai, China). The inner diameter and outer diameter of MWCNTs are 3-5 nm and 8-15 nm, respectively. Length is 3-12 μm , density is 0.15 gr/cm³. Poly (vinyl alcohol) (PVA) was supplied from ADR Group, purity is 87.8% (CAS No:9002-89-5). Diiodomethane (reagent plus, 99%),

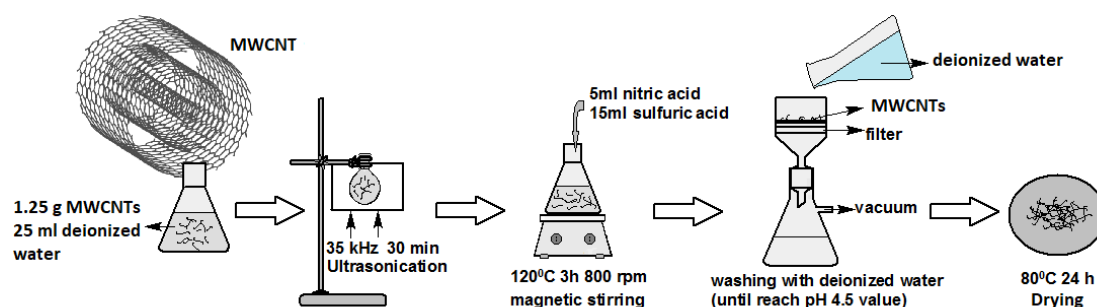


Figure 1. Carboxylation of MWCNTs

nitric acid (ACS reagent, 70%) and sulfuric acid (reagent grade, 95-98%) were purchased from Sigma (St. Louis, MO, USA). Deionized water obtained from a PURELAB® Option-Q (ELGA LabWater, UK) unit at a conductivity less than $0.5 \mu\text{S cm}^{-1}$.

2.2. Carboxylation of MWCNTs

The carboxylation process was performed to introduce carboxyl groups onto the surface of the MWCNTs to increase the compatibility among components of the composite film according to the method reported by [11,12] with slight modifications. 1.25 grams of MWCNTs were dispersed in 25 ml distilled water for 30 min by using a Sonicator (35 kHz) (Sonorex super, Bandelin, Berlin, Germany). The 5 ml of HNO_3 and 15 ml H_2SO_4 was added into the resulting MWCNT dispersion at 120°C and hold for approximately 3 h. After filtering the solid sample was washed repeatedly with deionized water until the filtrate pH value approached 4.5 and then dried in a vacuum oven (Nuve, EV018, Ankara, Turkey) at 80°C for 24 h. After being oven-dried, the carboxylated MWCNTs (i.e., MWCNTs-COOH) were obtained and these carboxylated MWCNTs were denoted as functionalized-MWCNTs (f-MWCNTs). The carboxylation process of MWCNTs was given in Figure 1.

2.3. Preparation of f-MWCNTs/Micro Cellulose/PVA Composite

A 10 wt % aqueous solution of PVA powder was stirred at 90°C for 1 h by using magnetic hot stirrer (Mtops MS300HS, Korea) [13]. The neat PVA solution poured into a Petri dish to produce neat PVA film and the solution was dried for 7 days at room temperature ($23 \pm 2^\circ\text{C}$). Then free-standing $60 \mu\text{m}$ thick films were peeled from the glass plate and were subjected to different tests.

In the production process of PVA-micro cellulose composite film, firstly, micro cellulose fibers (5 g) were soaked in deionized water (100 ml) for 24 h before use. And then, fibers were mixed for 1 h by using magnetic stirrer, after this step, they were sonicated using a high-intensity sonifier (35 kHz, 320 W) for 10 minutes [11]. During the ultrasonic process, the solution was cooled in an ice/water bath to avoid solution overheating. The solution was mixed with the neat PVA solution and stirred for 1h at 90°C . After, the stirring solution was poured into a Petri dish. Drying process was completed in 7 days.

The f-MWCNTs were dispersed in deionized water through stirring for 3 h and sonicated for 30 min. [5]. Both PVA and f-MWCNTs solutions were mixed, stirred for 1 h at 90°C , and again sonicated for 30 min. The mixture was poured into a petri dish to form composite films. The solution was dried for 7 days at room temperature ($23 \pm 2^\circ\text{C}$).

The similar solution casting method was used to prepare the PVA, f-MWCNTs, micro cellulose composites. The prepared micro cellulose and f-MWCNTs solution were incorporated into neat PVA solution. After magnetic stirring 30 min and sonication 30 min, the solution was

poured into a Petri dish. Drying process accomplished at 7 days. The process of composite preparation was shown in Figure 2 in detail.

Reprocessing was performed by using the similar procedure. Defective composite films were dissolved in deionized water at 90°C . After 1h magnetic stirring and 30 min sonication, solution poured into Petri dish. The solution was dried for 7 days at room temperature ($23 \pm 2^\circ\text{C}$). All tests were repeated for the reprocessed samples. The sample codes of composite films were presented in Table 1.

Table 1. Prepared composite films and sample codes

| Sample code | PVA wt. % | MWCNT wt. % | Cellulose wt. % |
|-------------|-----------|-------------|-----------------|
| PVA | 100 | 0 | 0 |
| PVA/r | 100 | 0 | 0 |
| PCe | 95 | 0 | 5 |
| PNT | 95 | 5 | 0 |
| PCeNT | 95 | 2.5 | 2.5 |
| PCe/r | 95 | 0 | 5 |
| PNT/r | 95 | 5 | 0 |
| PCeNT/r | 95 | 2.5 | 2.5 |

r:Reprocessed

2.4. Contact Angle and Surface Free Energy Measurements

The contact angles of composite films were measured with Theta Optical Tensiometer (KSV Attension Instruments, Helsinki, Finland) according to the sessile drop method technique using two different test liquids (ultrapure water and diiodomethane). The contact angle measurements were performed at 5 random locations on the composite film surfaces at room temperature ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) and were expressed as the mean of these measurements and the standard deviation. The mean contact angle values were used to calculate the components of surface free energy (SFE) according to the Owens–Wendt method (1969) described by Huner, Gulec, Damar Huner [14] in detail.

2.5. Raman Spectroscopy

Raman spectroscopy was used to better understand the interfaces interaction between micro cellulose, MWCNTs and PVA. Raman spectra of the composite films were recorded using a DXR Raman Microscope (Thermo Fisher Scientific, Madison, Wisconsin) equipped with a laser source which has 532 nm excitation wavelength. Spectral resolution was 5.0 cm^{-1} . All the spectra were collected in the range $100\text{--}3500 \text{ cm}^{-1}$.

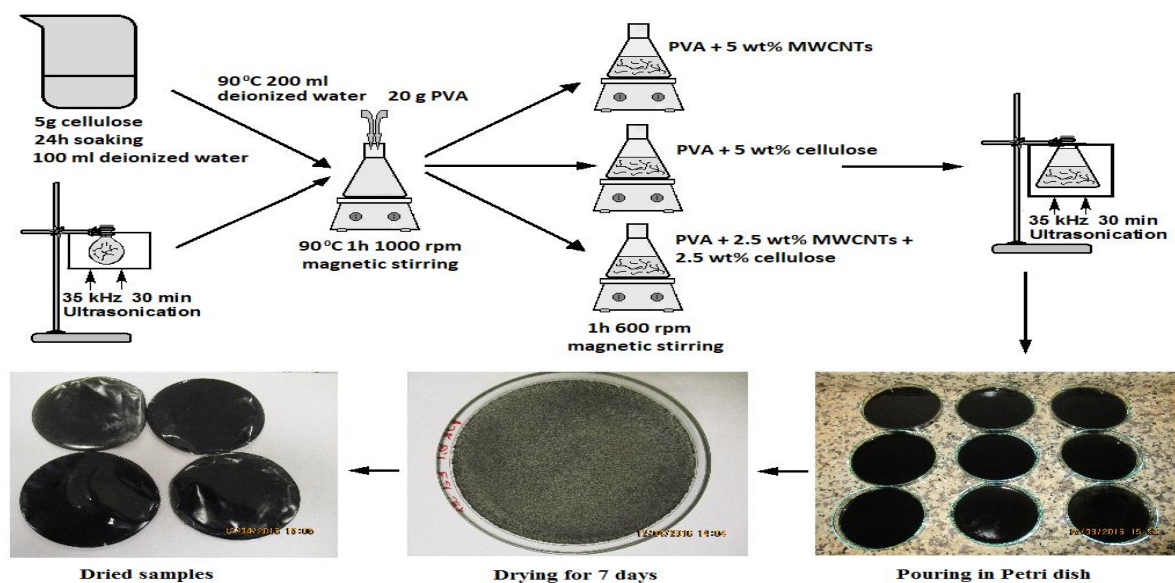


Figure 2. Composite preparation processes

2.6. Scanning Electron Microscopy (SEM)-Transmission Electron Microscopy (TEM)

The MWCNTs and micro cellulose structures were investigated by TEM. A few drops of diluted composite solution (0.5 wt % in water) were deposited on a TEM copper grid and dried. The sample grids were analyzed using a JEOL TEM-1400 (Jeol, USA) at an accelerating voltage of 120 kV.

The morphological characteristic of composite samples was carried out using a QUANTA FEG 250 (Oregon, USA) scanning electron microscope with LFD (wide area, low vacuum) detector. An accelerating voltage of 2 and 5 kV was used to collect the SEM images.

2.7. Attenuated Total Reflectance– Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR)

ATR-FTIR spectroscopy was used to get information about the functional group that exists in PVA composite films. The IR spectra of the films were obtained using an IR spectrometer (Perkin-Elmer spectrum BX, Perkin-Elmer, Canada). ATR-FTIR spectra of the samples were collected in the range of 4000-400 cm^{-1} with a resolution of 4 cm^{-1} . Composite surfaces analyzed were in contact with a ZnSe crystal with a 45° angle of incidence. At least five samples were analyzed.

2.8. UV-visible spectroscopic analysis

The UV-vis spectra of the PVA and composite films were recorded using a UV-Vis spectrometer (UV-1800, Shimadzu, Kyoto, Japan) in the visible light wavelength region of 200–800 nm at 25 °C. The absorbance spectra were acquired using air as background.

2.9. Mechanical testing

Specimens were prepared using a razor blade according to ISO 37-3 standard and tested at a crosshead speed of 50 mm min^{-1} . The dimensions of each specimen were 50

mm in length by 4 mm in width. The thickness of each specimen was measured by using Mitutoyo Digital Outside Micrometer (Kanagawa, Japan, ± 0.001 mm repeatability). The average thickness of the films was measured randomly at five different locations on each film samples. Before the tensile test, all specimens were kept in a controlled room at 23 ± 2 °C and $50 \pm 2\%$ relative humidity for 24 h. At least 5 samples were tested for each composite films.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Contact angle results

The contact angle (CA) values of the neat PVA and the PVA composite films were listed in Table 2. PVA is a semi-crystal hydrophilic polymer consist of one hydroxyl group in each repeat unit and hence cross-linkable [15]. Therefore, the water droplet was absorbed by the neat PVA polymer very quickly [8]. In this case, the neat PVA showed about 38° CA value. After incorporation of micro cellulose or MWCNTs, CA value increased according to the neat PVA. Both micro cellulose and MWCNTs reinforcement provided maximum CA value.

Previous studies [5,9,10,16–18] revealed that chemical treatment, heat treatment, a cross-linking agent can make PVA structure more hydrophobic due to changing its crystallinity or cross-linking. Micro cellulose acted as a cross-linking agent in the PVA structure [11]. In the cross-linking with micro cellulose, polar groups (like –OH) of PVA matrix, take part in cross-linking reaction, and it prevents moving of polar groups to the surface of the polymer. On the other hand, the presence of MWCNTs affected the surface morphology of PVA matrix due to changing crystallinity of structure [19]. MWCNTs and the amorphous state of PVA surface formed more hydrophobic surface. After the

Table 2. Contact angle measurements of primary production and reprocessed composite films

| | PCe | PNT | PCeNT | PCe/r | PNT/r | PCeNT/r |
|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\theta_w(^{\circ})$ | 56.7±2.5 | 85.1±2.3 | 70.6±0.7 | 42.0±0.7 | 69.6±0.5 | 55.3±0.6 |
| $\theta_D(^{\circ})$ | 42.1±1.0 | 29.0±2.0 | 34.3±0.5 | 33.5±0.8 | 39.0±5.0 | 39.9±0.7 |
| γ_s^d (mJ/m ²) | 38.5±0.5 | 44.6±0.8 | 39.9±0.2 | 42.7±0.4 | 39.9±0.2 | 42.1±0.3 |
| γ_s^p (mJ/m ²) | 15.0±1.3 | 1.4±0.4 | 7.2±0.4 | 21.7±0.4 | 7.7±0.4 | 14.4±0.3 |
| γ_s^{tot} (mJ/m ²) | 53.5±1.8 | 46.0±1.2 | 47.1±0.4 | 64.4±0.5 | 47.6±0.4 | 56.5±0.4 |
| $\gamma_s^p/\gamma_s^{tot}$ | 0.28 | 0.03 | 0.15 | 0.33 | 0.16 | 0.25 |

r: Reprocessed; γ_s^d : Disperse component; γ_s^p : Polar component; γ_s^{tot} : Surface total energy

hybridization process, PVA composite films exhibited more hydrophobic behavior due to both presence of micro cellulose and MWCNTs. Montes et al. [3] reported a decrease of PVA nucleation in the presence of cellulose nanocrystals. These interactions most probably restricted the capability of the matrix chains to form large crystalline domains. But the presence of the small amount of graphene in the PVA/ cellulose nanocrystal composite structure increased the degree of crystallinity [3,6,20]. Incorporation of MWCNTs into matrix demonstrated the same effect in this study. Consequently, it provided the increase of contact angles. Figure 3a) depicts MWCNTs and micro cellulose reinforced PVA surface.

The reprocessed composite film showed a decrease in contact angle values. It may be attributed to the reduction in molecular interaction between PVA matrix and reinforcements due to reprocessing. Surface total energy (γ_s^{tot}) almost did not change but polar component increased after reprocessing. As previously described, the increase of surface polar component causes the decrease of water contact angle value. And also, Figure 3b) revealed that surface roughness of composite film increased after reprocessing. Surface roughness affects the contact angle measurement, vigorously. Increased reinforcement ratio causes nonuniform surface structure. This can be explained agglomeration of reinforcements.

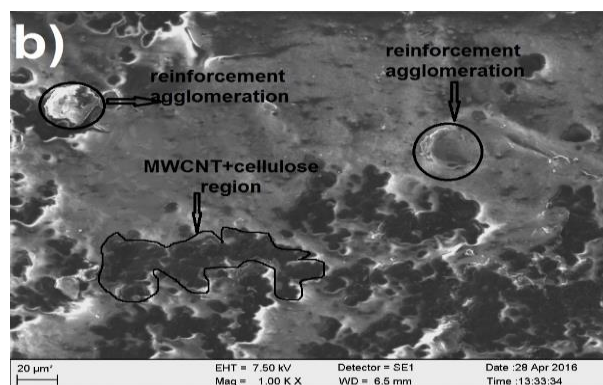
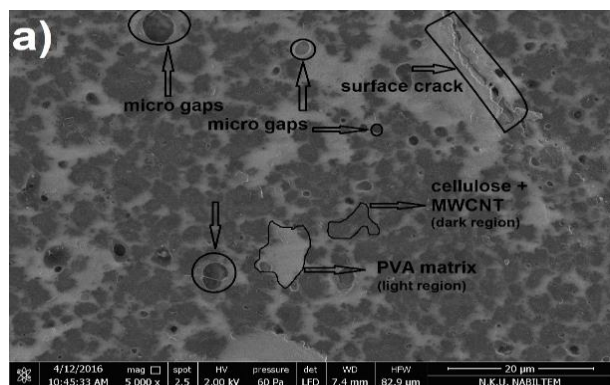


Figure 3. SEM micrograph of composite film surface a) 5% MWCNT and cellulose reinforced PVA surface b) agglomeration and reinforcement regions of PCeNT/r composite

3.2. Raman results

Raman spectroscopy was utilized to examine the interactions between the polymer and reinforcements. Figure 4a) shows Raman spectra of neat PVA and composites. Figure 4b) depicts Raman spectra of the reprocessed samples. The Raman spectrum of PVA showed a peak at 2921 cm⁻¹ which is assigned to the intrinsic (CH₂) stretching band [1]. All micro cellulose containing composites showed a peak near 1095 cm⁻¹ (D band) due to the presence of cellulose [4]. The Raman peak initially located at 1095 cm⁻¹ corresponding to the C–O stretching. The band at 1245 cm⁻¹ (G band) corresponds to C=C, sp²-hybridized carbon, derived from the MWCNTs structure [21]. And also, -COOH structure appeared at near 3050 cm⁻¹ (G' band). This band indicates that there might be an interaction taking place in the form of hydrogen bonding between the carboxyl and hydroxyl groups of MWCNTs-COOH and PVA matrix [4].

Reprocessing effect on Raman spectra has been shown in Figure 4b). While micro cellulose effect disappeared remarkably, MWCNTs maintained the effect on composite structure, decreasingly. As shown in Figure 4b), at 1370 cm⁻¹ (D band), a strong band appeared in the Raman spectra of MWCNTs which stem from the sp³-hybridized carbon or structural defects. Additionally, at

1550 cm^{-1} (G band), a relatively weak band corresponded to vibration of sp^2 -hybridized graphitic domains [4,21].

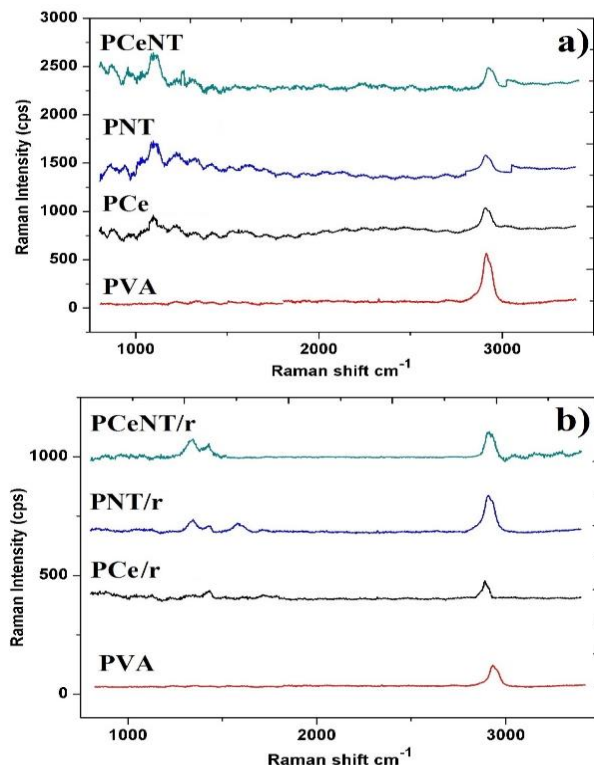


Figure 4. Raman spectra of PVA composite films a) primary production composite films b) reprocessed composite films

3.3. ATR-FTIR results

The interactions between MWCNTs, micro cellulose, hybrid composition, and PVA were observed by FTIR and the results are shown in Figure 5. An important absorption peak was verified at 1150 cm^{-1} , which is associated with the C–C stretching mode of PVA and is generally related to the crystallinity of PVA [9,20]. The absorption band at 1055 cm^{-1} in the spectra of micro cellulose fiber is attributed to the C–O stretching vibration and anomeric carbon b-D-glucopyranosyl of cellulose, indicating the typical structure of cellulose [11,22]. For the MWCNTs, the characteristic peaks in FTIR spectra represented at 1750 cm^{-1} and 1640 cm^{-1} indicated the stretching vibration of carboxylic acid C=O (Oswald-Lehman) and C=O amidic groups, respectively [5]. The presence of amidic group was represented as a proof of MWCNTs in the structure by Mallakpour et al. [5]. FTIR results of this case also revealed that increase of MWCNTs ratio did not significantly change the intensity of peak. This may be attributed to the presence of the structure of MWCNTs-COOH which bond with neither PVA nor micro cellulose. The large bands were observed between 3600 and 3200 cm^{-1} are linked to the stretching of hydroxyl groups which are involved in the intramolecular and intermolecular hydrogen bonds in PVA and micro cellulose [6,22,23]. Incorporation of MWCNTs provided reducing of free –OH groups in the hybrid composite structure. Therefore, the straight band

appeared with the increase of MWCNTs level. The absorption band between 2840 and 3000 cm^{-1} refers to the stretching C–H from alkyl groups, which is shifted to lower wave number and its intensity decreased with the addition of MWCNTs and micro cellulose [23]. This was mainly attributed to reaching maximum level in bonding formation by free –OH groups of cellulose and carboxyl groups of MWCNTs.

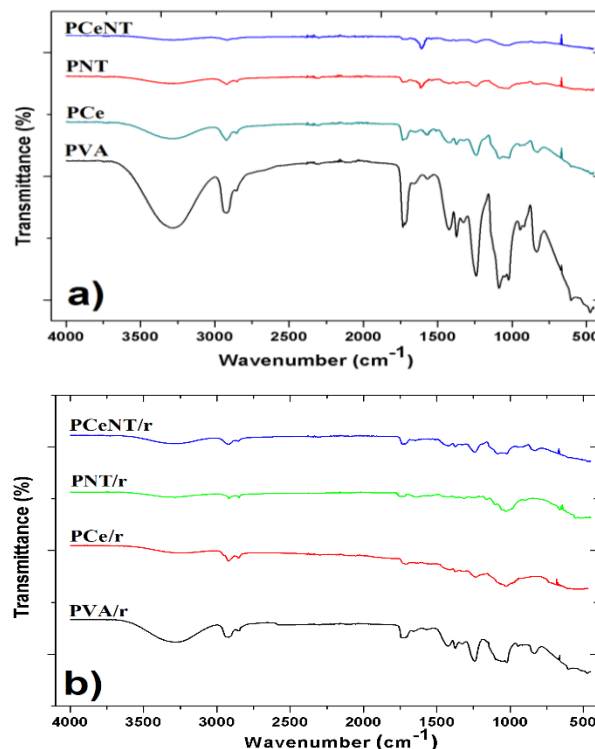


Figure 5. FTIR spectra results of composite films a) primary composite film's FTIR spectra b) reprocessed film's FTIR results

When the reprocessing effect was taken into consideration, the peak verified at 1150 cm^{-1} which were associated neat PVA lost its intensity. This might be attributed to changing the degree of crystallinity of PVA [7,20]. After reprocessing, reinforcements (micro cellulose, MWCNTs and hybrid composition) formed more agglomerated structure (Figure 6) and new molecular interactions change the new crystalline structure of PVA [7]. Influence of MWCNTs has been disappeared near the peak of 1638 cm^{-1} , but micro cellulose maintains its impact near the band of 1055 cm^{-1} . 3200 - 3600 cm^{-1} band showed nearly similar band formation with primary reinforced PVA. Consequently, results showed that reprocessing caused intensity decrease on molecular interaction and MWCNTs lost the bonding efficiency in intermolecular level. Therefore, it may cause to lose its superior effect on the hybrid structure at the macro level.

3.4. TEM (Transmission Electron Microscopy) results

TEM analysis was used to evaluate the structure of PVA composite at the nano level. Dispersion of MWCNTs and bonding formation between PVA matrix and reinforcements were observed by using TEM. Figure 6 represents the images of the PVA matrix reinforced with micro cellulose and MWCNTs. It is clear that, while MWCNTs exhibited a straight shape in regions where the dispersion is better (Figure 6a) and it transformed into helix-like shape with increasing agglomeration ratio (Figure 6b). These formations come together and form a cluster (Figure 6c). Mallakpour et al. [5] reported about amino acid functionalized MWCNTs which incorporated into PVA matrix. They stated that the coils structures in MWCNTs formed as a result of hydroxyl group interaction of PVA matrix and amino acid functionalities on the surface of f-MWCNTs. Similar results are available in reprocessed composites for this case. It is clearly seen in Figure 6c and d, interactions between components of composite caused agglomeration. Figure 6 also revealed that reprocessed hybrid composite structure was formed by hybrid cluster core and its micro cellulose and MWCNTs extensions. This formation provides strong bonding and good interaction in the interface of the composite.

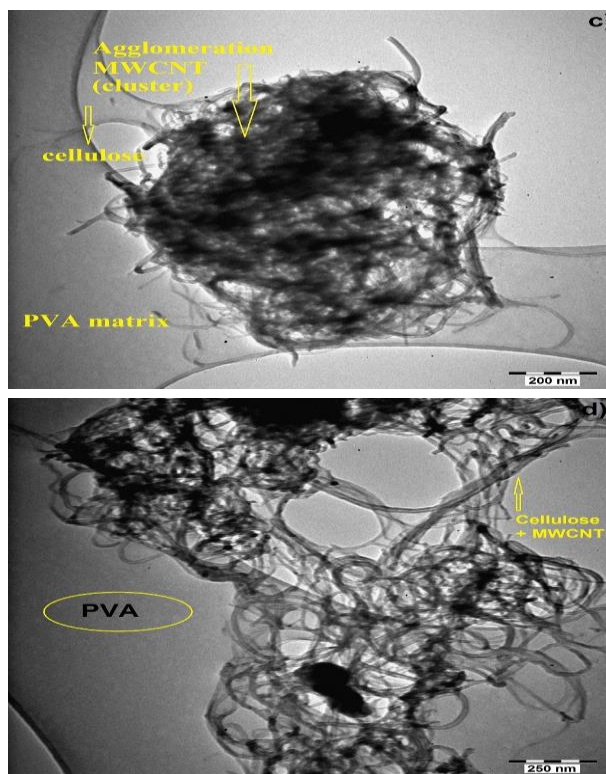
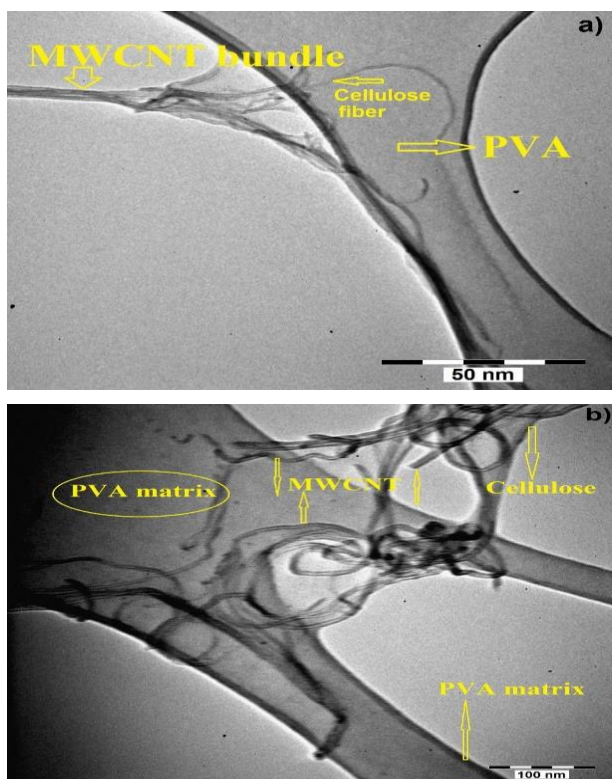
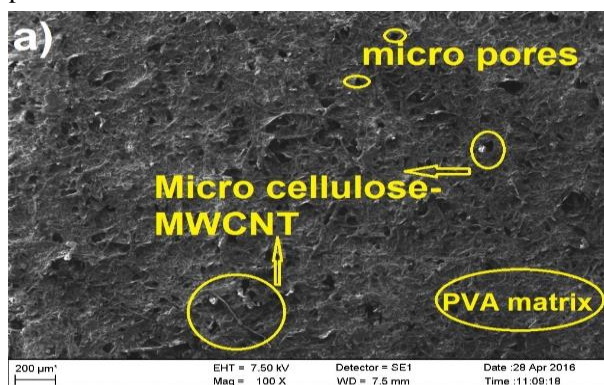


Figure 6. TEM micrograph of composites a) micro structure of PCeNT composite film b) twisted shape of reinforcements (PCeNT) c) agglomeration of reinforcement d) link between reinforcements

3.5. SEM (Scanning Electron Microscopy) Results

Scanning electron microscopy was used to investigate the dispersion of the reinforcements in the composite samples. Figure 7 depicts the hybrid composite film surface (PCeNT) in large and narrow scale. While Figure 7a) shows the rougher surface which contacted with air in the Petri dish during the drying process, Figure 7b) represents the bright surface which contacted with Petri dish surface during the drying process. However, it is observed that both surfaces exhibited different size of pore-like structures with mostly dark color. This was mainly attributed to the accumulation of MWCNTs on pore-like surface.



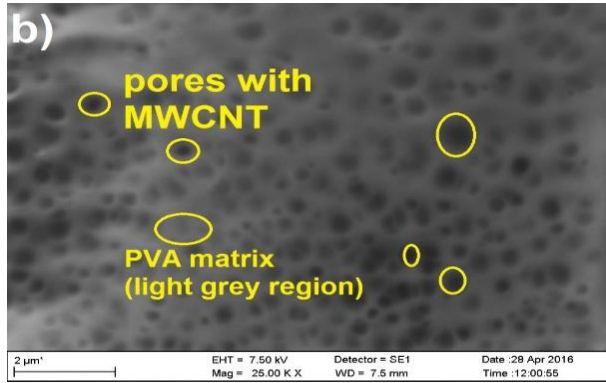


Figure 7. SEM micrograph of PCeNT a) rougher surface of composite film b) pore-like formations of surface

Figure 8 exhibits the cluster formation and linking between micro cellulose-MWCNTs reinforcement. The apparent formation was supported by TEM results that are mentioned before. Amrin et al. [1] reported similarly that when the concentration of CNT (carbon nanotube) is increased the clusters begin to form larger agglomerates. Figure 8a) clearly indicated that micro micro cellulose-MWCNTs have a core-like cluster and each of this form link with their extensions to PVA and each other. It may carry more efficient load transfer to the matrix from reinforcement. Figure 8b) shows also inner structure of the film in narrow scale.

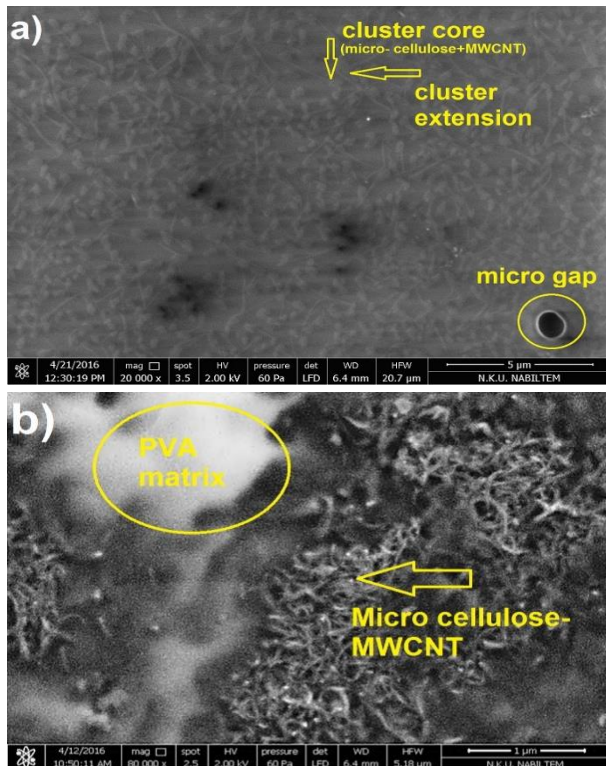


Figure 8. Surface micrograph of composite film (PCeNT) a) linking between reinforcements b) inner structure of composite film

The effect of reprocessing is shown in Figure 9. Figure 9a-b depicts PNT/r and PCeNT/r, respectively. As it can be observed in Figure 9a), PNT/r exhibited lower

agglomeration on the surface than PCeNT/r composite. This was mainly attributed to weakened bond structure between reinforcement and PVA matrix. During the reprocessing for the hybrid composite, PVA dissolves easily in water but the bonding between micro cellulose and MWCNTs is still ongoing due to not enough process time. Therefore, micro cellulose-MWCNTs aggregates in PVA matrix.

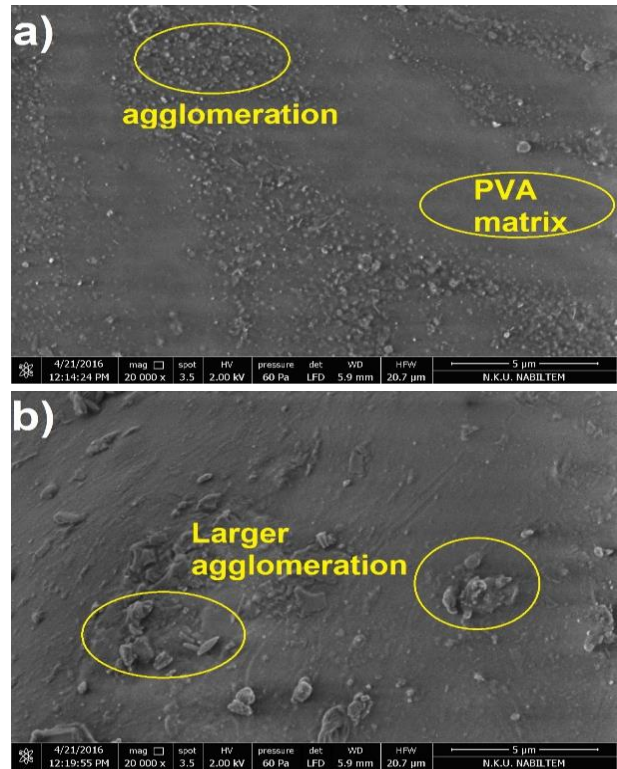


Figure 9. Surface micrograph of reprocessed PVA composite films a) lower size of agglomeration (PCeNT/r) b) larger size of agglomeration (PCeNT/r)

3.6. Optical properties of PVA composite films

Figure 10 shows the UV-Vis absorption spectra of PVA and composite films. Incorporation of reinforcements (MWCNTs, micro cellulose or both) caused strong transparency loss even though the reinforcement content was only 5 wt %. Most of the transparency loss is due to the presence of MWCNTs [9,21]. As it was observed in Figure 10a), the large amount of incident light was absorbed by the components of film and absorbance line started between values of 2.5-3.0. While the neat PVA exhibited a shoulder peak at 298 nm, composite films showed broadband between 200-450 nm. This is attributed to the extended π -conjugated system of the MWCNTs sidewalls [9,21]. All composites exhibited nearly similar band configuration and slope of chart lines. UV-Vis and morphological results are considered together, reinforcement showed good dispersion through the composite film. Absorbance peaks of composite films located at 200-400 nm that is narrower according to primary production films. The starting point of absorbance line declined to about 1.80-1.90. This result indicates that incident light has not been reflected and

refracted by the reinforcement through the film. This may be attributed to agglomeration of micro cellulose and MWCNTs which caused in-homogeneous dispersion in composite film.

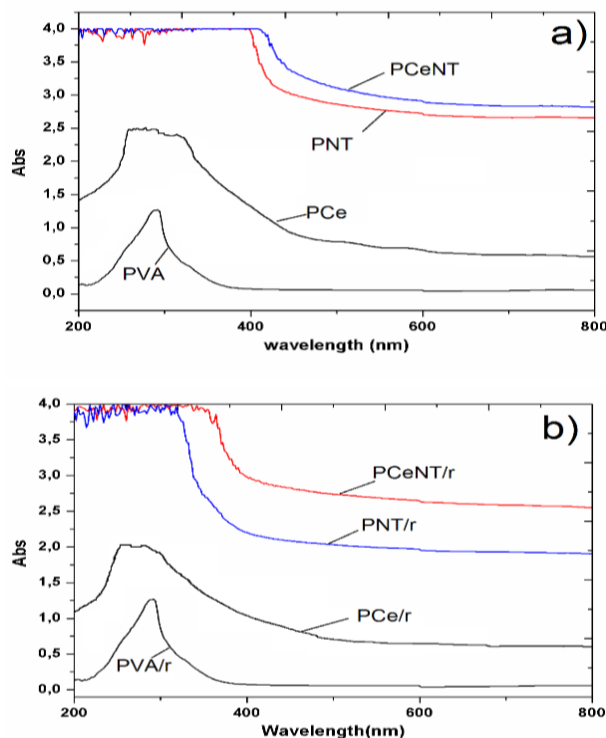


Figure 10. UV-Vis properties of PVA composite films a) absorbance characteristic of primary production films b) absorbance characteristic of reprocessed films

3.7. Mechanical results

Tensile tests were performed to determine the contribution of micro cellulose, MWCNTs and hybrid composition to the strength of PVA composite films. Representative stress–elongation at break curves of composite films with various reinforcement types are shown in Figure 11. Table 3 also represents the tensile test results of composites and reprocessed composites. The neat PVA film showed the maximum stress of 29 MPa and elongation at break of 194 %. The tensile stress of micro cellulose and MWCNTs reinforced PVA composite was improved about 2.5 times and elongation at break decreased about eight times according to the neat PVA film. While Young’s modulus of the neat PVA was 984 MPa, hybrid composite showed 1954 MPa modulus value. These results indicated that the hybrid composites exhibited much higher tensile strength and Young’s modulus and more rigid features with higher load-bearing capacity.

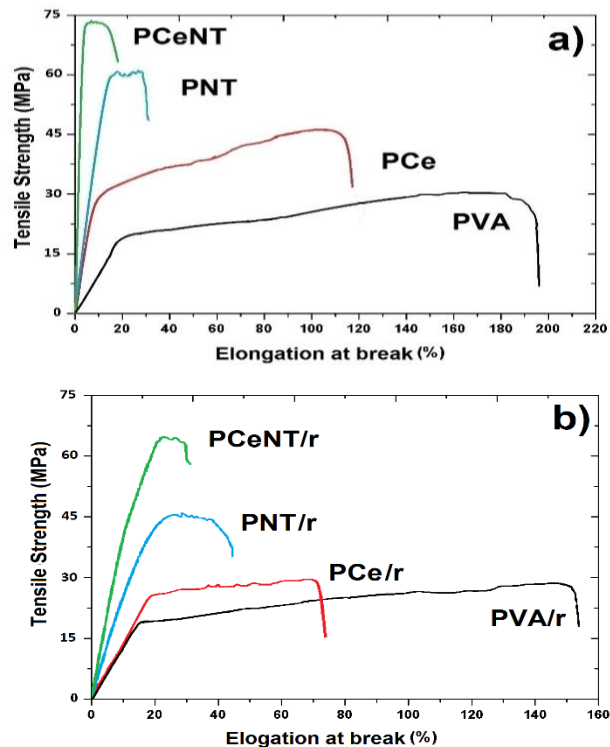


Figure 11. Tensile properties of PVA composite films a) representative stress- elongation at break graph of primary production composites b) changing of tensile graph of reprocessed composites

Table 3. Tensile properties of fabricated PVA composite films

| Sample ID | Tensile Strength (MPa) | Elongation at Break (%) | Young’s Modulus (MPa) |
|-----------|------------------------|-------------------------|-----------------------|
| PVA | 29 ± 3.5 | 194 ± 11.8 | 984 ± 62 |
| PCe | 46 ± 3.7 | 119 ± 9.4 | 1435 ± 55 |
| PNT | 61 ± 7.7 | 31 ± 5.7 | 1688 ± 84 |
| PCeNT | 73 ± 6.4 | 21 ± 1.1 | 1954 ± 96 |
| PVA/r | 26 ± 2.8 | 156 ± 7.6 | 891 ± 42 |
| PCe/r | 29 ± 3.9 | 72 ± 6.4 | 1128 ± 63 |
| PNT/r | 45 ± 4.1 | 44 ± 5.2 | 1271 ± 77 |
| PCeNT /r | 63 ± 4.8 | 33 ± 2.7 | 1562 ± 87 |

As already mentioned before, micro cellulose and MWCNTs formed strong hydrogen bonding with PVA matrix due to the presence of larger hydroxyl groups on their surface. These structures cause good adhesion and efficiently load transportation between matrix and reinforcement. Mallakpour et al. [5] reported results supporting this phenomenon for MWCNTs reinforced PVA composites. It was demonstrated that incorporation of 5% MWCNTs provided an improvement on tensile strength and Young’s modulus about 120% and 66%, respectively (the neat PVA; tensile strength 29.7 MPa, elongation at break 164.1%). Another research [24]

suggested that higher cellulose nanofiber content in PVA resin exhibited better mechanical properties. The nano-cellulose (40 wt %) impregnation provided 1.5 times higher tensile strength and the decrease of strain from 200% to 30% according to neat PVA resin. The study also revealed that nano-cellulose content is not expected to reinforce composite film due to the presence of possible stress concentration of inner structure [16]. In this case, it was detected that embedded micro cellulose or MWCNTs in matrix improved the mechanical strength due to possible mechanical interlocking, change of matrix crystallinity, or good interfacial adhesion as in similar studies. Micro cellulose bonded both PVA and MWCNTs and formed the reticulated structure which exhibited better mechanical properties (Figure 12a). It can be stated that micro cellulose acted like crossover connection between PVA and MWCNTs in hybrid composite structure.

Considering the effect of reprocessing, reprocessed neat PVA showed a slight change in mechanical properties. Specifically, no differences were observed in tensile strength (26 MPa). In a similar manner, Young's modulus (891 MPa) had also minor change (approximately 8%). This may be attributed to changing of crystallinity after reprocessing [3,8,20]. If the mechanical properties of composite films are to be addressed, lower strength values are encountered compared to the primary production films. The hybrid micro cellulose and MWCNTs reinforced composite showed a tensile strength value about 63 MPa according to reprocessed neat PVA. However, it was 12% lower than primary production hybrid PVA composite. This was mainly attributed to cluster like structures (Figure 9) which cause stress concentrations in the interface of the composite [24,25]. These formations lead to the decrease in mechanical properties. The weak mechanical interlocking and load transfer between matrix and reinforcements were observed due to poor adhesion. As shown in fracture surface of films (Figure 12b), insufficient reinforcement wetting and agglomeration caused weak regions which acted like a notch. Consequently, in spite of the same production conditions, different characteristic behaviors of the components have prevented getting similar mechanical properties.

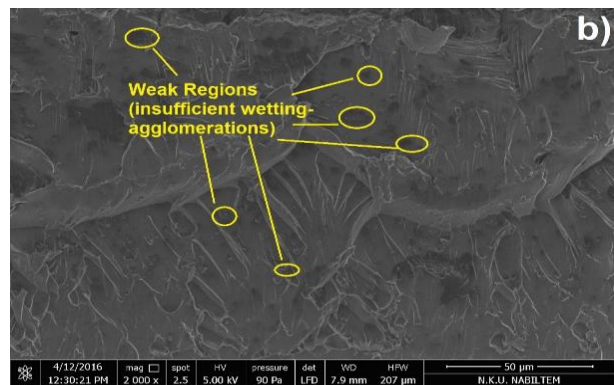
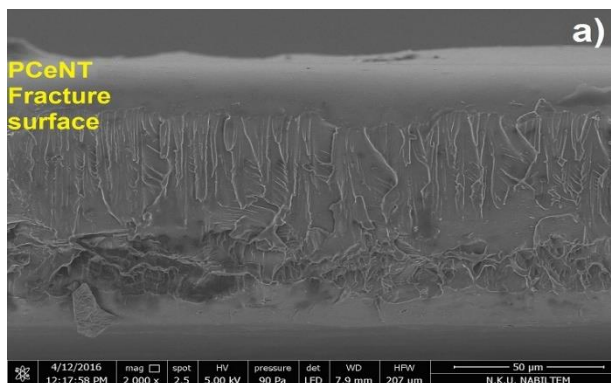


Figure 12. SEM micrograph of composite films a) fracture surface of PCeNT b) weak regions of fracture surface of reprocessed composite film

4. CONCLUSION

In this study, solution casting method was used to produce PVA hybrid composite films. MWCNTs, micro cellulose, and hybrid composition were used as a reinforcement material. Even though the lower content of reinforcement was used, the remarkable enhancement was obtained in hydrophilicity and mechanical properties. Reprocessed composite films exhibited lower strength than primary production composites. However, the strength of reprocessed composites was conspicuously higher than neat PVA. Morphological results revealed that as primary production composite films exhibited more homogeneous dispersion, reprocessing caused agglomeration inner structure.

REFERENCES

- [1] Amrin S., Deshpande V.D., "Electrical properties and conduction mechanism in carboxyl-functionalized multiwalled carbon nanotubes/poly(vinyl alcohol) composites", *J. Mater. Sci.*, 51: 2453–2464, (2016).
- [2] Castell P., Cano M., Maser W.K., Benito A.M., "Combination of two dispersants as a valuable strategy to prepare improved poly(vinyl alcohol)/carbon nanotube composites", *Compos. Sci. Technol.*, 80:101-107, (2013).
- [3] Montes S., Carrasco P.M., Ruiz V., Cabañero G., Grande H.J., Labidi J., Odriozola I., "Synergistic reinforcement of poly(vinyl alcohol) nanocomposites with cellulose nanocrystal-stabilized graphene", *Compos. Sci. Technol.*, 117:26–31, (2015).
- [4] Tanpichai S., Sampson W.W., Eichhorn S.J., "Stress transfer in microfibrillated cellulose reinforced poly(vinyl alcohol) composites", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 65: 186–191, (2014).
- [5] Mallakpour S., Abdolmaleki A., Borandeh S., "L-Phenylalanine amino acid functionalized multi walled carbon nanotube (MWCNT) as a reinforced filler for improving mechanical and morphological properties of poly(vinyl alcohol)/MWCNT composite", *Prog. Org. Coatings.*, 77: 1966–1971, (2014).
- [6] Zhang L., Zhang G., Lu J., Liang H., "Preparation and Characterization of Carboxymethyl Cellulose/Polyvinyl Alcohol Blend Film as a Potential Coating Material", *Polym. Plast. Technol. Eng.*, 52: 163–167, (2013).

- [7] Mallapragada S.K., Peppas N., "Dissolution Mechanism of Semicrystalline Poly (vinyl alcohol) in Water", *J. Polym. Sci.*, 34: 1339–1346, (1996).
- [8] Zhang W., Zhang Z., Wang X., "Investigation on surface molecular conformations and pervaporation performance of the poly(vinyl alcohol) (PVA) membrane", *J. Colloid Interface Sci.*, 333: 346–353, (2009).
- [9] Zhang C., Huang S., Tjiu W.W., Fan W., Liu T., "Facile preparation of water-dispersible graphene sheets stabilized by acid-treated multi-walled carbon nanotubes and their poly(vinyl alcohol) composites", *J. Mater. Chem.*, 22: 2427–2434, (2012).
- [10] Zhang X., Liu T., Sreekumar T. V., Kumar S., Moore V.C., Hauge R.H., Smalley R.E., "Poly (vinyl alcohol)/ SWNT Composite Film", *Nano Lett.*, 3: 1285–1288, (2003).
- [11] Peng J., Ellingham T., Sabo R., Turng L.S., Clemons C.M., "Short cellulose nanofibrils as reinforcement in polyvinyl alcohol fiber", *Cellulose.*, 21: 4287–4298, (2014).
- [12] Hu H., Zhang T., Yuan S., Tang S., "Functionalization of multi-walled carbon nanotubes with phenylenediamine for enhanced CO₂adsorption", *Adsorption.*, 23: 73–85, (2017).
- [13] Deng Q., Li J., Yang J., Li D., "Optical and flexible α -chitin nanofibers reinforced poly(vinyl alcohol) (PVA) composite film: Fabrication and property", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 67: 55–60, (2014).
- [14] Huner U., Gulec H.A., Damar Huner I., "Atmospheric pressure plasma jet treatment of wheat straw for improved compatibility in epoxy composites", *J. Appl. Polym. Sci.*, 135: 1–11, (2018).
- [15] Naebe M., Lin T., Tian W., Dai L., Wang X., "Effects of MWNT nanofillers on structures and properties of PVA electrospun nanofibres", *Nanotechnology.*, 18: 225605, (2007).
- [16] Zhou T., Chen F., Tang C., Bai H., Zhang Q., Deng H., Fu Q., "The preparation of high performance and conductive poly (vinyl alcohol)/graphene nanocomposite via reducing graphite oxide with sodium hydrosulfite", *Compos. Sci. Technol.*, 71: 1266–1270, (2011).
- [17] Wang J., Wang X., Xu C., Zhang M., Shang X., "Preparation of graphene/poly(vinyl alcohol) nanocomposites with enhanced mechanical properties and water resistance", *Polym. Int.*, 60: 816–822, (2011).
- [18] Bahrami S.B., Kordestani S.S., Mirzadeh H., Mansoori P., "Poly (vinyl alcohol) - Chitosan Blends: Preparation, Mechanical and Physical Properties", *Iran. Polym. J.*, 12: 139–146, (2003).
- [19] Song P., Cao Z., Cai Y., Zhao L., Fang Z., Fu S., "Fabrication of exfoliated graphene-based polypropylene nanocomposites with enhanced mechanical and thermal properties", *Polymer (Guildf.)*, 52: 4001–4010, (2011).
- [20] Virtanen S., Vartianen J., Setälä H., Tammelin T., Vuoti S., "Modified nanofibrillated cellulose–polyvinyl alcohol films with improved mechanical performance", *RSC Adv.*, 4: 11343–11350, (2014).
- [21] Wen-Yin Ko J.-W.S., Lin K.-J., "Sonophysically Exfoliated Individual MultiWalled Carbon Nanotubes in Water Solution and their Straightforward Route to Flexible Transparent Conductive Films", *Carbon Nanotub. Appl. Electron Devices.*, 333–350, (2011).
- [22] Oishi Y., Nakaya M., Matsui E., Hotta A., "Structural and mechanical properties of cellulose composites made of isolated cellulose nanofibers and poly(vinyl alcohol)", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 73: 72–79, (2015).
- [23] Qiao K., Zheng Y., Guo S., Tan J., Chen X., Li J., Xu D., Wang J., "Hydrophilic nanofiber of bacterial cellulose guided the changes in the micro-structure and mechanical properties of nf-BC/PVA composites hydrogels", *Compos. Sci. Technol.*, 118: 47–54, (2015).
- [24] Tang C., Liu H., "Cellulose nanofiber reinforced poly(vinyl alcohol) composite film with high visible light transmittance", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 39: 1638–1643, (2008).
- [25] Alonso S., Escobar M., Augusto C., Merino I., Manuel J., Meza M., "Mechanical and thermal behavior of polyvinyl alcohol reinforced with aligned carbon nanotubes", *Rev. Mater.*, 20: 794–802, (2015).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Frezeleme operasyonlarında kesme kuvvetlerinin deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi: saf molibdenin işlenmesi üzerine bir çalışma

An investigation into the experimental and finite element analysis of cutting forces in milling: a study on machining of pure molybdenum

Yazarlar (Authors): Hüseyin GÖKÇE¹, İbrahim ÇİFTÇİ², Harun GÖKÇE³

ORCID¹: 0000-0002-2113-1611

ORCID²: 0000-0001-7875-6324

ORCID³: 0000-0002-2702-0111

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Gökçe H., Çiftçi İ. ve Gökçe H. “Frezeleme operasyonlarında kesme kuvvetlerinin deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi: saf molibdenin işlenmesi üzerine bir çalışma”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 947-954, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.482604

Frezeleme Operasyonlarında Kesme Kuvvetlerinin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analizi ile İncelenmesi: Saf Molibdenin İşlenmesi Üzerine Bir Çalışma

Araştırma Makalesi / Research Article

Hüseyin GÖKÇE¹, İbrahim ÇİFTÇİ², Harun GÖKÇE^{3*}

¹Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Türkiye

³TÜBİTAK Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü Aerodinamik Birimi, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 14.11.2018 ; Kabul/Accepted : 07.01.2019)

ÖZ

Bu çalışmada, ticari saflıktaki molibden sementit karbür kesici takım kullanılarak farklı işlem değişkenlerinde frezeleme işlemine tabi tutulmuştur. İşleme esnasında oluşan kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Ayrıca, kesme kuvvetlerinin sonlu elemanlar analizi (SEA) kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Sonlu elemanlar analizi için Deform-3D yazılımı kullanılmıştır. Kesici takım, tersine mühendislik teknikleri ile Geomagic Design X yazılımında modellenmiştir. Farklı işlem değişkenleri ve kuru işleme şartları altında yapılan deneyler sonucu elde edilen veriler ile sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen kesme kuvvetleri ile sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında %10 mertebelerinde bir fark ile sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Frezeleme, Sonlu Elemanlar Analizi (SEA), deform-3D.

An Investigation into the Experimental and Finite Element Analysis of Cutting Forces in Milling: A Study on Machining of Pure Molybdenum

ABSTRACT

In this study, milling tests were carried out on commercially pure molybdenum. The tests were conducted at various cutting parameters using carbide cutting tools without coolant. The cutting forces acting on the workpiece during the milling tests were measured. In addition, the cutting forces were aimed to be determined through finite element analysis (FEA) method. Deform-3D software was used for finite element analysis. The cutting tool was modelled through reverse engineering approach using Geomagic Design X software. The measured cutting force results were compared with the finite element analysis results and a good correlation (a 10 % difference) was seen between the measured and modelled results.

Keywords: Milling, Finite Element Analysis (FEA), deform-3D.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İleri mühendislik uygulamalarında kullanılan ve refrakter metallere olan molibden ve molibden esaslı alaşımların üstün mekanik özelliklerinin olduğu bilinmektedir [1]. Molibden yüksek ergime noktası, yüksek ısı iletkenliği, yüksek elastikiyet modülü ve düşük ısı genleşme katsayısı ile karakterize edilir [2].

Ticari saflıktaki molibden savunma ve havacılık sanayileri başta olmak üzere pek çok farklı sektörde kullanılmaktadır. Talaş miktarı düşük olan son işleme operasyonları, kaliteli parça üretimi gerekliliğinden dolayı kritik imalat süreçlerindedir. Yüksek yüzey kalitesi ve boyut tamlığı gereksiniminden dolayı, son işlemeyi etkileyen parametrelerin önceden belirlenmesi ve optimize edilmesi önemlidir. Bu nedenle kesme hızı,

ilerleme miktarı, talaş derinliği ve kesici takım malzemesi ve geometrisi gibi kesme parametrelerinin tespit edilmesi gerekmektedir.

Talaş kaldırma işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetleri, işlenen parça boyutları ve yüzey kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek kesme kuvvetleri, kesme bölgesinde sıcaklığın yükselmesine sebep olarak takım ömrünü ve çalışma performansını etkileyecektir [3]. Ayrıca yüksek kesme kuvvetleri işlem esnasında iş parçasının kırılmasına veya ciddi olarak deforme olmasına da neden olabilir. Bu durum, özellikle molibden gibi çok pahalı malzemelerde ciddi maliyet artışlarına neden olur. Kesme kuvvetleri; iş parçası malzemesi, kesici takım ve kesme parametrelerine bağlı olarak değişir. Dolayısıyla, düşük kesme kuvvetleri sağlayabilmek için kesici takım ve işleme koşullarının belirlenmesi yüksek kaliteli bileşenlerin düşük maliyette üretilmesi için önemlidir [4-6].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : harungokce@yahoo.com

Talaşlı imalatta üretimi; takım tezgâhı, malzeme, kesici takım ve insan gerçekleştirmektedir [7]. Kesme işleminin doğru analiz edilebilmesi için, işlemeden önce, işleme sırasında ve işleme sonrasında gözlemlerin yapılması gerekir [8]. Günümüzde yüksek kapasiteli bilgisayarların mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılması ile gerçekleştirilen gözlemler ve yaklaşık çözümler büyük önem kazanmıştır. Özellikle sonlu elemanlar metodu, yüksek doğrulukta sonuçlar vermesi nedeniyle problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır [9-12].

İşleme esnasında kesici takımın maruz kaldığı yükler kesme işleminin ekonomikliği ve gerekli olan gücün belirlenmesi açısından en önemli parametredir. Kesici takım ve kesici takımların kesme esnasında maruz kaldığı yükler kesici takımlarda ki aşınmaların açısından çok önemli bir etmendir. Bu nedenle kesici takımın oluşan gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin dikkatli bir şekilde incelenmesi gerekmektedir [13-15].

Talaşlı imalatın sonlu elemanlar metodu kullanılarak modellenmesi yaklaşımının ortaya çıkması 1970'li yıllara kadar dayanmaktadır ve o günden bugüne bu konuda birçok araştırma yapılmıştır [16,17]. Komvopoulos vd. ortogonal kesme esnasında talaş oluşumunu, talaş akışını, takım-talaş ara yüzeyindeki sürtünme ve takım aşınmasını incelemek için sonlu elemanlar analizini kullanmışlardır [18]. Brinksmeier vd. OFHC bakır, bronz CuZn39Pb3 ve alüminyum AlMg5 malzemelerinin yüksek hızda elmas kesici takımlarla yapılan tornalama ve frezeleme işlemini kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi ve takım aşınması açısından sonlu elemanlar analizi kullanarak simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir [19]. Cui vd. sertleştirilmiş çeliklerin kesintisiz ve aralıklı olarak seramik kesici takımlarla tornalanması esnasında kesme hızının ve talaş açısının etkisini sonlu elemanlar analizi yardımı ile incelemişlerdir [20]. Gökçe vd. sementit karbür matkapların, delik delme etkinlikleri sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin deneysel olarak belirlenmesi ve elde edilen deneysel sonuçların, matkap üzerindeki etkilerinin sonlu elemanlar metodu kullanılarak analiz etmişlerdir [21]. Varlık vd. dönme hareketinin kesici takım üzerindeki etkisi güdümlü ve kendiliğinden hareketli dönel takımlarla karşılaştırmalı olarak sonlu elemanlar analizi ile incelemişlerdir [22]. Laakso ve Niemi sonlu elemanlar analizi AISI 1045 çeliğinin ters analiz ve analitik bir model ve kesme deneyleri ile önerilen kombine ters analiz ile edinilen AISI 1045 için Johnson Cook parametrelerinin beş farklı seti için performans değerlendirmesi yapılmıştır [23]. Pius vd. talaşlı imalat sürecinde sıcaklık dağılımının analitik modellenmesi

sonlu elemanlar analizi ile yapmışlardır [24]. Villumsen ve Fauerholdt sonlu elemanlar analizi ile talaşlı imalatta oluşan kesme kuvvetlerini tahmin etmişlerdir [25]. Aydın düzlemsel gerinim koşulları altında iş parçasında oluşan kalıcı gerilmeleri tahmin etmek için dik kesme sürecinin ısı-mekanik sayısal analizi gerçekleştirmişlerdir [26]. Kurt ve Şeker Al 2007 alüminyum alaşımı malzemenin ortogonal kesme işleminde kullanılan 0,1, 0,2 ve 0,4 mm talaş derinliğinin kesici takım gerilmeleri üzerindeki etkilerini sonlu elemanlar metodu kullanılarak analiz etmişler ve derinliğe bağlı olarak kesme kenarındaki gerilmelerin değişimi incelemişlerdir [27]. Işık talaşlı imalatta kesici takımların kırılma öncesi davranışlarının incelenmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemi ile statik ve dinamik analizler yapmıştır [28].

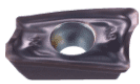
Refrakter malzemelerin işlenmesi üstün özelliklerinden dolayı zordur ve bunların işlenmesi hakkında bilgiler literatürde nadir bulunmaktadır [29, 30]. Saf molibden üzerine yapılmış deneysel çalışmalar son derece sınırlıdır ve SEA kullanılarak molibdenin kesme süreci analiz edilmemiştir. Bu çalışmada ticari saflıktaki molibdenin, sementit karbür kesici takımlarla frezeleme yöntemiyle işlenmesi esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin deneysel olarak ölçülmesi ve bir SAE yazılımı kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. KESİCİ TAKIM VE İŞ PARÇASI MALZEMESİ (CUTTING TOOL AND WORKPIECE MATERIAL)

Talaşlı imalat işleminde sonlu elemanlar analizinin doğru yapılabilmesi için en önemli unsurların başında iş parçası malzemesi özelliklerinin doğru girilmesi ve kesici takımın gerçeğe uygun olarak tasarlanabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle SEA modelinde iş parçası malzemesi özellikleri Deform-3D programının kütüphanesi referans alınarak elde edilmiştir. Kesici takım tasarımı ise tersine mühendislik teknikleri kullanılarak yapılmıştır. Kesici takım ve takım tutucu özellikleri Çizelge 1'de, iş parçası özellikleri ise Çizelge 2'de verilmiştir.

Kesici takım seçiminde üretici firma tavsiyeleri ve daha önce yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır. Kesici takım uç yarıçapı 0,8 mm olacak şekilde temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan kesici takım Ø12 mm çapında değiştirilebilir uçlu takım tutucuya rijit bir şekilde mekanik olarak bağlanmıştır. Takım tutucu, tek ağızlı (bir adet kesici takımın bağlandığı) olarak seçilmiştir. Kesme esnasında oluşan yüklerden dolayı sehim ve burulmaları minimize edilebilmesi için takım tutucu, pens tutucusundan 40 mm çıkacak şekilde bağlanmıştır.

Çizelge 1. Kesici takım ve takım tutucu özellikleri (Cutting tool and tool holder properties)

| No | Takım markası | Takım kodu | Resim | Kalite sınıfı | Tutucu kodu |
|----|---------------|------------------|--|------------------------|------------------------|
| 1 | Mitsubishi | AOMT123608PEER-H |  | VP15TF PVD (Al,Ti)N | KMTAOMT100R 121W16S |

İş parçası olarak 50x50x5 mm boyutlarında prizmatik parçalar hazırlanmıştır. Kesme kuvvetleri ölçümü için yapılan deneylerde kesici takım Şekil 1’de görüldüğü gibi alından talaş kaldıracak şekilde bir frezeleme yöntemi kullanılmıştır. Eksenel kesme derinliği 0,5 mm olarak verilmiştir. Takım tutucu eksenine, iş parçalarının 5 mm’lik kısmının ortasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır.

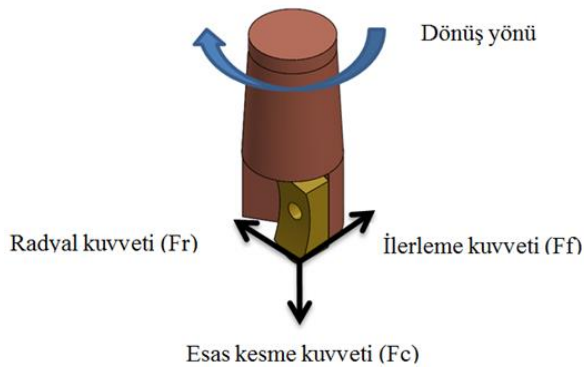
3. DENEY DÜZENİĞİ (EXPERIMENTAL SETUP)

Kesme kuvvetleri deneyleri Johnford VMC-550 CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır. Molibden ve alaşımlarının işlenmesi esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin ölçülmesinde üç kuvvet bileşenini (F_c , F_f , F_r) aynı anda ölçme kapasitesine sahip, Kistler 9272-A tipi piezoelektrik esaslı bir dinamometre kullanılmıştır.

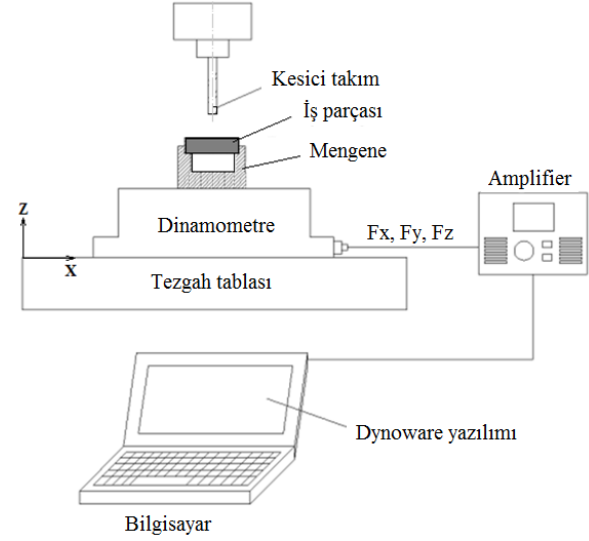
Çizelge 2. İş parçalarının çeşitli özellikleri (Various features of work pieces)

| Özellik | Birim | Saf Molibden |
|---------------------------------|-------------------|--------------|
| Kimyasal Bileşim | % | >99,97 Mo |
| Yoğunluk (20 °C’de) | g/cm ³ | 10,22 |
| Ergime noktası | °C | 2617 |
| Akma gerilmesi | MPa | 600 |
| Çekme gerilmesi | MPa | 800 |
| Elastikiyet modülü | GPa | 330 |
| Sertlik | BHN | 205 |
| Poison oranı | | 0,38 |
| Isı iletim katsayısı (20 °C’de) | [W/(mK)] | 138 |

Şekil 1’de frezeleme operasyonu sırasında oluşan kesme kuvvetleri gösterilmiştir. İşleme deneylerinde üç kuvvet bileşeni de ölçülmüş ancak analizlerde en büyük olan ilerleme kuvveti (F_f) dikkate alınmıştır. Şekil 2’de deneysel çalışma için kurulan deney düzeneği şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. Frezeleme operasyonu sırasında oluşan kesme kuvvetleri (Cutting forces during milling operation)



Şekil 2. Deney düzeneği (Experimental setup)

4. KESİCİ TAKIM MODELLEME (CUTTING TOOL MODELING)

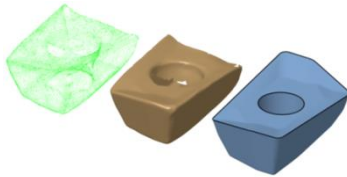
Çalışmada kesici takımlara ait model bilgileri üç boyutlu tarayıcı yardımıyla elde edilmiştir. Kesici takımların taranmasında kullanılan tarayıcı 30 mm küçük, 1500 mm büyük görüş alanına sahip, minyatür projeksiyon tekniği ile çalışan, LED ışık kaynaklı, 0,8 ila 8,0 megapiksel arasında değişen beş farklı çözünürlüğe göre ayarlanabilmektedir. Tarama işlemi AICON Smart Scan marka tarayıcı ile yapılmıştır Şekil 3’te tarama işlemi gösterilmektedir.



Şekil 3. Tarama işlemi görüntüsü (Scan process image)

Geomagic Design X yazılımı içerisine alınan nokta bulutu verisi StereoLithography (STL) formatına dönüştürülmüştür. Kesici takım üzerinden elde edilen nokta sayısı 230077 adettir. Nokta bulutu üzerinden tekrar modelleme yapılabilmesi için noktalar arasında ağ model oluşturulmuştur. Bunun için Mesh Building Wizard yardımı ile ağ boyutları ve noktalar arasındaki en yüksek ve en düşük uzunluk bilgisine göre ağ model oluşturulmuştur. Ağ yapısı, en büyük ağ boyutu 2,5 mm ve noktalar arası en fazla uzaklığı 0,1 mm olacak şekilde

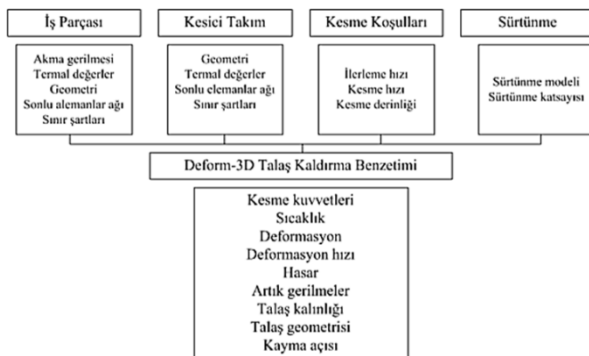
hazırlanmıştır. Ağ modeli, noktaların birbirleri ile uzaklık değişimleri dikkate alınarak eğrisellik ve yarıçap dönüşümlerine göre bölgelere ayrılmıştır. Bölge tanımlaması ile parça üzerinde düzlem ve silindirik yapıların ayrıştırılması sağlanmıştır. Belirlenen bu form yapılarından yararlanılarak, parçanın yan yüzeyine ve ortasına birer düzlemsel yüzey oluşturulmuştur. Bunun için Surface Primitives komutundan ilgili bölge ve oluşturulmak istenen form yapısı seçilmiştir. Elde edilen üç boyutlu kesici takım modeli ile nokta bulutu verisi arasındaki sapma miktarının minimize edilmesi çok önemlidir. Bunun için bölge tanımlamaları ile elde edilen tüm yüzeyler için (Deviation Analysis) sapma analizinin yapılması gerekmektedir. Sapma analizi parça boyutu, çalışma hassasiyeti ve bölgesel kararlılık değişkenleri dikkate alınarak incelenir. Bu kesici takımlar için izin verilen en yüksek sapma miktarı 0,05 mm'dir. Bu nedenle oluşturulan her yüzeyde bu analiz kontrolü yapılmıştır. Şekil 4'te tersine mühendislik sonucu belirlenen kesici takımın üç boyutlu modeli görülmektedir.



Şekil 4. Kesici takım modeli (Cutting tool model)

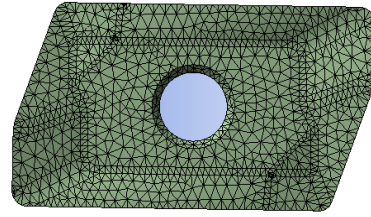
5. SONLU ELEMANLAR PARAMETRELERİ (FINITE ELEMENT PARAMETERS)

Talaşlı imalat işleminin sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmek için kullanılan programa, kesici takım ve iş parçasının mekanik ve termal değerleri, kesme parametreleri, sürtünme cinsi ve katsayısı, işlemin mekanik ve termal sınır şartları gibi verilerin girilmesi gerekmektedir. Bu değerler ne kadar doğru olursa, ortaya çıkan analiz sonuçları da deneysel sonuçlara yakın değerlerde olur [21]. Şekil 5'te SEA uygulanabilmesi için gerekli olan giriş ve çıkış parametreleri gösterilmiştir.

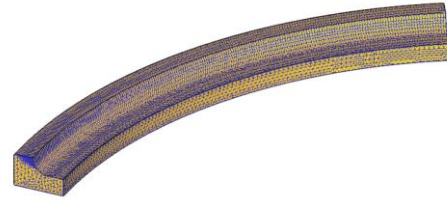


Şekil 5. SEA giriş ve çıkış parametreleri (SEA input and output parameters) [20]

Oluşturulan sayısal modelde iş parçasının sonlu elemanlar ağı 3095 üçkenarlı elemandan ve 3196 düğümünden, takımın sonlu elemanlar ağı ise 1098 üçkenarlı elemandan ve 1164 düğümünden oluşmaktadır. İş parçası kalıcı şekil değişikliğine maruz kalacağından plastik olarak modellenip, işlem sırasında hiç elastik deformasyon göstermediği kabulü yapılmıştır. Takım aşınması dikkate alınmadığında kesici takım rijit olarak modellenmiştir. Şekil 6'da kesici takım ve iş parçasına uygulanan ağ (mesh) yapısı görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6. Ağ yapısı a) kesici takım ve b) iş parçası (Mesh structure a) cutting tool and b) workpiece)

Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken iş parçası üzerinde, deformasyon işleminin gerçekleştiği bölgelerde sonlu elemanlar ağı daha sık, deformasyon bölgesinden uzakta olan bölgelerde ise daha kaba olarak oluşturulmuştur. Sık ağ yapısını içeren bölge kesici takım hareketini izlemektedir.

Kesici takım her üç ekseninde de (X, Y ve Z) sınırlandırılmış (sabitlenmiş) ve sadece dönme hareketi verilmiştir. İş parçasına ise sadece X ekseninde hareket verilmiştir. İş parçası, takıma doğru Vc kesme hızı ile X ekseninde hareket etmekte, kesici takım ise dönme hareketini (devir) gerçekleştirmektedir. Çizelge 3'te deneyler ve SEA için kullanılan işlem parametrelerini göstermektedir.

Çizelge 3. Deneylerde ve SEA için kullanılan işlem parametreleri (Process parameters used for experiments and FEA)

| Analiz seviyesi | Kesme hızı (m/dak) | Kesme hızı (m/s) | İlerleme miktarı (mm/diş) | Devir (dev/dak) | Devir (dev/s) |
|-----------------|--------------------|------------------|---------------------------|-----------------|---------------|
| Analiz 1 | 75 | 1,250 | 0,05 | 1990 | 33,16 |
| Analiz 2 | 100 | 1,666 | 0,1 | 2654 | 44,23 |
| Analiz 3 | 125 | 2,083 | 0,15 | 3317 | 55,28 |
| Analiz 4 | 150 | 2,50 | 0,2 | 3981 | 66,35 |

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Kesme esnasında kesici takım üzerinde meydana gelen kuvvetler, kurulan sonlu elemanlar modeli üzerinden tespit edilmiştir. Deneysel çalışma ve SEA ile elde edilen kesme kuvvetleri Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Deneysel çalışma ve SEA ile elde edilen kesme kuvvetleri (Experimental work and cutting forces obtained by FEA)

| Deney no | Kesme hızı (V_c) | İlerleme miktarı (f) | Devir sayısı (N) | Kesme kuvveti (F_f) deneysel | Kesme kuvveti (F_f) SEA |
|----------|----------------------|--------------------------|------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| | m/dak | mm/diş | dev/dak | N | N |
| 1 | 75 | 0,05 | 1990 | 256 | 223 |
| 2 | 100 | 0,1 | 2654 | 330 | 309 |
| 3 | 125 | 0,15 | 3317 | 360 | 333 |
| 4 | 150 | 0,2 | 3981 | 441 | 426 |

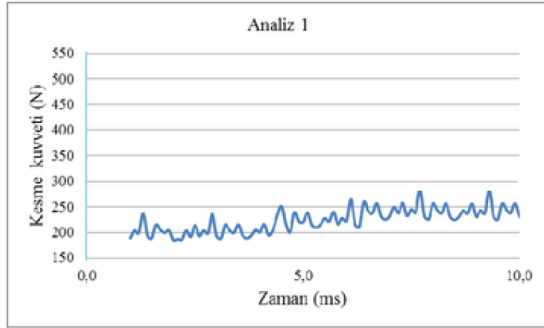
İlerleme miktarının artması ile kesme kuvvetlerin artması, talaşlı imalatta beklenen bir durumdur. Bu durumu; ilerleme hızının artışı sonucunda artan talaş kesiti ile ilişkilendirmek mümkündür [31]. Talaş kesitinin artması sonucu, talaş kaldırmak için gerekli olan enerjinin de artması demektir. Enerjinin artması da eksenel kuvvetlerin artmasına sebep olmaktadır [32]. Benzer durumu kesme hızları açısından da söylemek mümkündür. Kesme hızının artması ile kesme kuvvetlerinde artışların gözlemlendiği çeşitli çalışmalar

literatürde yer almaktadır. Çalışmalarda, kesme kuvvetlerindeki artışın kesme derinliğinden, kesici takım kaplamasından ve işlenen malzeme tipinden etkilenerek arttığı görülmektedir [33-36]. Tablo 4'te deneysel çalışma ve SEA ile elde edilen kesme kuvvetleri verilmiştir. 75 m/dak kesme hızında oluşan kesme kuvveti (deneysel:256N, analiz:223N), kesme hızının 150 m/dak çıkmasıyla artmıştır (deneysel:441N, analiz:426N).

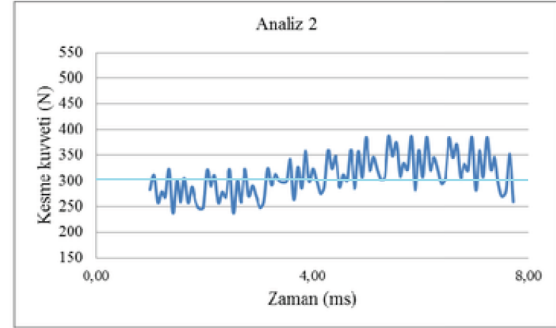
SEA sonucu elde edilen veriler Şekil 7'deki grafikler yardımıyla elde edilmiştir. Deneysel kesme kuvvetleri ise dinamometre ile Dynoware yazılımı yardımıyla elde edilen grafiklerin (Şekil 8) kararlı bölgelerinden alınan değerlerin ortalamaları hesaplanarak bulunmuştur.

Şekil 9'da deneysel çalışma ve SEA sonucu elde edilen kesme kuvvetlerinin karşılaştırması grafikte gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakın ve grafik sonucu elde edilen eğriler birbiri ile oldukça tutarlıdır. SEA sonucu elde edilen kesme kuvvetleri, deneysel çalışma sonucu elde edilen kesme kuvveti değerlerinden düşük çıkmıştır.

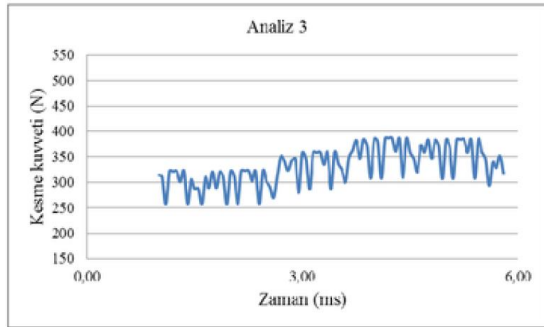
Şekil 9'da deneysel çalışma ve SEA sonucu elde edilen kesme kuvvetlerinin karşılaştırması grafikte gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakın ve grafik sonucu elde edilen eğriler birbiri ile oldukça tutarlıdır. SEA sonucu elde edilen kesme kuvvetleri, deneysel çalışma sonucu elde edilen kesme kuvveti değerlerinden düşük çıkmıştır.



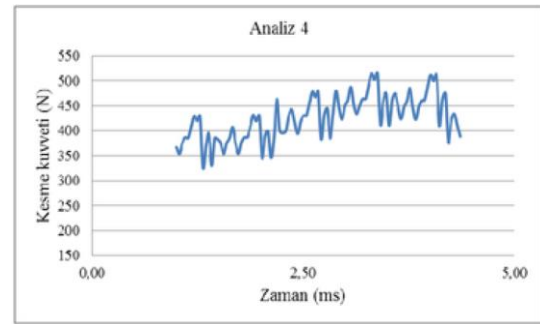
a) V_c :75 m/dak, f :0,05 mm/diş



b) V_c :100 m/dak, f :0,1 mm/diş

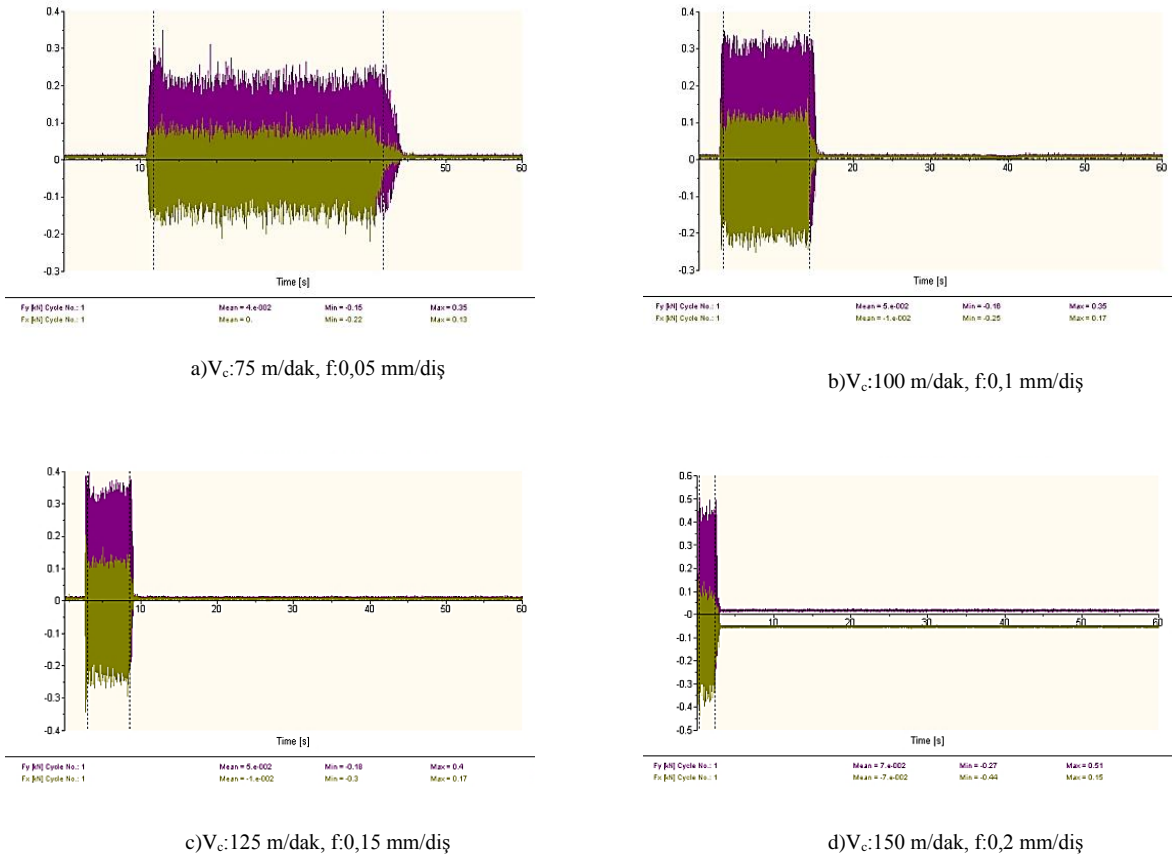


c) V_c :125 m/dak, f :0,15 mm/diş



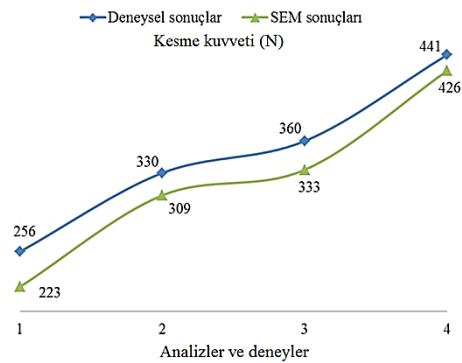
d) V_c :150 m/dak, f :0,2 mm/diş

Şekil 7. SEA sonucu elde edilen kesme kuvvetleri (Cutting forces resulting from FEA)



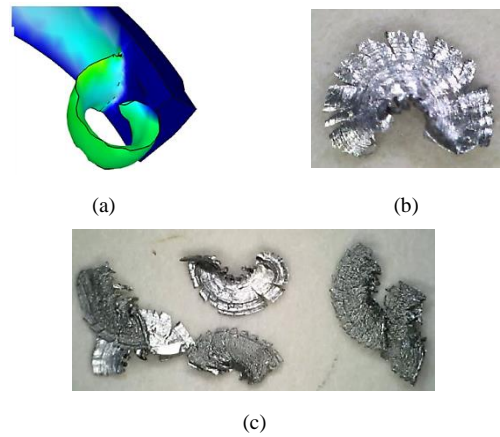
Şekil 8. Deneysel kesme kuvvetleri (Experimental cutting forces)

Deney sonuçları ve analiz sonuçları arasında %10 mertebelerinde farklılıklar görülmüştür. Bunun muhtemel sebebi iş parçası malzeme modeli için girilen Johnson Cook parametrelerindeki katsayıların literatürden elde edilmesi ve gerçek malzeme modelinin elde edilememesinden kaynaklandığı şeklinde değerlendirilmektedir. Ayrıca, iş parçası ve kesici takım arasında oluşan ısı transfer katsayısının, deneysel ortam şartlarına göre farklılık göstermesi şeklinde de değerlendirilebilir.



Şekil 9. Deneysel ve SEA sonucu elde edilen kesme kuvvetlerinin karşılaştırması (Comparison of experimental and FEA results)

Şekil 10'da analizin 0 – 0,5 ms arasında oluşan talaş formu (a) ve deneysel çalışma sonucu oluşan talaş şekilleri (b ve c) gösterilmiştir. Deneysel çalışma sonucu oluşan talaşın ve SEA sonucu oluşan talaş formunun birbiri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Elde ettiğimiz talaş tipleri, sünek malzemelerin işlenmesi sonucu oluşan talaş tiplerine benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 10. a) Analiz sonucu oluşan talaş geometrisi b) - c) saf molibden talaşları (a) Chip geometry resulting from analysis b) - c) pure molybdenum chips)

7. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan bu çalışmada ticari saflıktaki molibdenin frezeleme yöntemiyle işlenmesi esnasında oluşan kuvvetlerin belirlenmesi için deneysel ve sonlu elemanlar analizi çalışması yapılmıştır. Yapılan sonlu elemanlar analizinin doğruluğunun belirlenmesi için, ticari saflıktaki bir molibden iş parçası malzemesinden farklı kesme parametreleri ile talaş kaldırma operasyonu deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Farklı kesme parametreleri ile elde edilen deneysel veriler, sonlu elemanlar modeli ile elde edilen sonuçlarla doğrulanmıştır. Çıkan sonuçlardan elde edilen başlıca çıkarımlar şu şekilde özetlenebilir:

- Deneysel çalışmalardan elde edilen kesme kuvvetleri ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarının %90 oranlarında tutarlı olduğu görülmüştür.
- Deneysel çalışma sonucu oluşan talaşın ve SEA sonucu oluşan talaş formunun birbiri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Elde ettiğimiz talaş tipleri, sünek malzemelerin işlenmesi sonucu oluşan talaş tiplerine benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir.
- Analiz sonucu hesaplanan kesme kuvvetleri ile deneysel sonuçlardan elde edilen kesme kuvvetlerinden nispeten düşük bulunmuştur. Bunun nedenleri arasında, takımın rijit olarak modellenmesi (takım aşınması), sıcaklığın etkisi gibi faktörler sayılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimi (KBÜ-BAP-15/2-DR-002) tarafından desteklenmiştir. Kuruma desteklerinden ötürü teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Pöhl, C., Schatte, J., Leitner, H., "Metallographic characterization of the molybdenum based alloy MHC by a color etching technique" *Materials Characterization*, 77: 63-69, 2013
- [2] Fan, J., Lu, M., Cheng, H., Tian, J., Huang, B., "Effect of alloying elements Ti, Zr on the property and microstructure of molybdenum" *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27: 78-82, 2009
- [3] Tekaüt, İ., Demir, H., "AISI H13 ve AISI D2 çeliklerinin delinmesi esnasında kesme bölgesinde oluşan sıcaklığa kesici takım kaplamasının ve işleme parametrelerinin etkisi" *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30(2): 289-296, 2015.
- [4] Kalpakjian, S., Schmid, S.R., "Manufacturing Engineering and Technology" 6th Edition, *Pearson Education*, 2009
- [5] Trent, E.M., Wright, P.K. "Metal Cutting, 4th Edition" *Butterworth Heinemann*, 2000
- [6] Wang, W., Kweon, S.H., Yang, S.H., "A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by miniaturized machine tool" *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163: 702-708, 2005
- [7] Işık, Y., "Talaşlı İmalatta Kesici Takımların Kırılma Öncesi Davranışlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi" *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 9(1): 2004
- [8] Akkurt, M., "Talaş kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları", 67-71, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 1991.
- [9] Günay, D., "Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodunun Temelleri", *Sakarya Üniversitesi Yayınları*, Adapazarı, 1993.
- [10] Kocacıçak, Ü., Çalışkan, M., "Makine Tasarımında Sonlu Elemanlar Yöntemi", *Sakarya Üniversitesi Yayınları*, Adapazarı, 1996.
- [11] Hinton, E., Owen, D., R., J., "An Introduction to Finite Element Computations", *Pineridge Press Limited*, Swansea, U.K., 1985.
- [12] Ulaş, H. B., Özkan, M. T. and Malkoç, Y., "Vibration prediction in drilling processes with HSS and carbide drill bit by means of artificial neural networks", *Neural Computing and Applications*, 1-16, (Article in Press). DOI:https://doi.org/10.1007/s00521-018-3379-3
- [13] Çakıroğlu R., "Delik Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Oluşan Sıcaklığın Modellenmesi" Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, 2011.
- [14] Yağmur S., "Delik Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Oluşan Sıcaklığın Deneysel Olarak İncelenmesi" Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, 2011.
- [15] Özkan, M. T., "Experimental and Artificial Neural Network Study of Heat Formation Values of Drilling and Boring Operations on Al 7075 T6 Workpiece", *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 20: 259-268, 2013.
- [16] Karagüzel, U., "Zirkonyum Esaslı Kalın Camsı Metalin Frezelenmesinin Sonlu Elemanlar Analizi" *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2010.
- [17] Mackerle J., "Finite Element Analysis And Simulation Of Machining: An Addendum A Bibliography" *Machine Tools And Manufacture*, Sweden, 2003.
- [18] K. Komvopoulos and S. A. Erpenbeck., "Finite Element Modeling of Orthogonal Metal Cutting" *J. Eng. Ind* 113(3): 253-267, 1991. doi:10.1115/1.2899695

- [19] Brinksmeier, E., Preuss, W., Riemer, O., Rentsch, R., “Cutting Forces, Tool Wear And Surface Finish İn High Speed Diamond Machining” *Precision Engineering*, 204-293, 2017.
- [20] Cui, X., Wang, D., Guo, J., “Influences of Tool Rake Angle and Cutting Speed on Ceramic Tool Failure in Continuous and Intermittent Turning of Hardened Steel” *Ceramics International*, 42(10): 12390-12400, 2016.
- [21] Gökçe, H., Yavuz, M., Gökçe, H., Şeker, U., “Orijinal Matkap Geometrisinde Delme Performansının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Doğrulanması” *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3: 1-8, 2017.
- [22] Varlık, T., Özdemir, K., Çakır, M., C., “Dönel Takımlar İle Tornalama İşleminin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi” *5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, Bursa, 2014.
- [23] Laakso, S., V.A, Niemi, E., “Using FEM Simulations of Cutting for Evaluating the Performance of Different Johnson Cook Parameter Sets Acquired with Inverse Methods” *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, 47: 95-101, 2015.
- [24] Pius, O., Benjamin, O., Nnaemeka, O., “Analytical Modeling of Temperature Distribution in Metal Cutting: Finite Element Approach” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, (2-4): 17-33, 2013.
- [25] Villumsen, M., F., Fauerholdt, T., G. “Prediction Of Cutting Forces İn Metal Cutting, Using The Finite Element Method, Alagrangian Approach” *LS-DYNA anwenderforum*, C-III-1, Bamberg, 2008.
- [26] Aydın, M., “Dik Kesme İşleminde Kalıcı Gerilmelerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 19(3) : 297-304, 2016.
- [27] Kurt, A., Şeker, U., “Kesici Takım Gerilmelerinin Sonlu Elemanlar Metodu Kullanılarak İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(4): 491-497, 2005.
- [28] Işık, Y., “Talaşlı İmalatta Kesici Takımların Kırılma Öncesi Davranışlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 9(1): 2004.
- [29] Sortino, M., Totis, G., Proserpi, F., “Dry Turning Of Sintered Molybdenum” *Journal of Materials Processing Technology*, 213: 1179-1190, 2013.
- [30] Gökçe, H., Çiftçi, İ., “Molibden Alaşımlarının İşlenmesinde Kesici Takım ve Kesme Parametrelerinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu” *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, doi: 10.17341/gazimmfd.416482, 2018.
- [31] Çakıroğlu, R., “Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerine bağlı olarak oluşan sıcaklığın modellenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011.
- [32] Yağmur, S., Acır, A., Şeker, U. ve Günay, M., “Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerinin kesme bölgesindeki sıcaklığa etkisinin deneysel incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(1): 1-6, 2013.
- [33] Wayal, V., Ambhore, N., Chinchankar, S. and Bhokse, V., “Investigation on Cutting Force and Vibration Signals in Turning: Mathematical Modeling Using Response Surface Methodology” *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 5-3B: 64-68, 2015.
- [34] Ojolo, S.J., Armuda, M.O.H., Orgunmola, O.Y. and Ononiwu, C.U., “Experimental determination of the effect of some straight biological oils on cutting force during cylindrical turning”, *Matéria* (Rio de Janeiro), 13-4, 2008.
- [35] Hou, J., Zhou, W., Duan, H., Yang, G., Xu, H and Zhao, N. “Influence of cutting speed on cutting force, flank temperature, and tool wear in end milling of Ti-6Al-4V alloy” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70: 9-12, 2014.
- [36] Turgut, Y., Çinici, H., Şahin, İ. ve Fındık, T., “Study of cutting force and surface roughness in milling of Al/Sic metal matrix composites”, *Scientific Research and Essays*, 6-10: 2056-2062, 2011.



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



R260 ray çeliğinin değişen sıcaklıklardaki davranışının EMI yöntemi ile incelenmesi

Investigation of the R260 rail steel behavior at varying temperatures by EMI method

Yazar(lar) (Author(s)): Mesut TEKKALMAZ¹, Gökhan HAYDARLAR², Ümit ER³

ORCID¹: 0000-0003-3781-0384

ORCID²: 0000-0001-7430-8145

ORCID³: 0000-0001-7447-504X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Tekkalmaz M., Haydarlar G. ve Er Ü., “R260 ray çeliğinin değişen sıcaklıklardaki davranışının EMI yöntemi ile incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 955-960, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.463956

R260 Ray Çeliğinin Değişen Sıcaklıklardaki Davranışının EMI Yöntemi ile İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mesut TEKKALMAZ, Gökhan HAYDARLAR*, Ümit ER

Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 26.09.2018 ; Kabul/Accepted : 04.01.2019)

ÖZ

Yapısal sağlık izleme (SHM)'de son yıllarda Elektromekanik Empedans (EMI) yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde yapısal sağlığı denetlenen yapıya kurşun-zirkonat-titanat (PZT) seramik sensör yaması eklenir. Empedans analizör kullanılarak empedans ve admittans karakteristikleri ölçülür. Bu ölçümler yapısal sağlığın değerlendirilmesinde referans karakteristiğini oluşturur. Bu karakteristiklerin yapıda hata, kusur vb. olmadığı sürece değişmemesi beklenir. Ancak değişen çevresel koşullar ve sıcaklık dalgalanmaları gibi bazı durumlarda bu karakteristiklerin değiştiği bilinmektedir. Eğer sıcaklık etkisi dikkate alınmazsa, yapıda hata, kusur vb. olmadığı halde varmış gibi yanlış yorumlamalara yol açar. Raylar sürekli olarak değişen çevresel koşullara maruz kalmaktadır. Bu çalışmada, R260 ray çeliğinin değişen sıcaklıklardaki davranışı EMI yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda, sıcaklık azaldıkça frekans ve genliğin değiştiği gözlenmiştir. Bu değişim hasar metrikleri kullanılarak yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: EMI yöntemi, sıcaklık etkisi, ray.

Investigation of the R260 Rail Steel Behavior at Varying Temperatures by EMI Method

ABSTRACT

In recent years, Electromechanical Impedance (EMI) method has been widely used in structural health monitoring (SHM). In this method, lead zirconate titanate (PZT) ceramic sensor patch is added to the structure to be monitored for structural health. Impedance and admittance characteristics are measured using an impedance analyzer, which forms the reference characteristic in the evaluation of structural health. It is expected that these characteristics will not change as long as there is no change in the structure. However, it is known that these characteristics change in some situations, such as exposure to external environmental conditions and temperature fluctuations. If the effect of temperature is not taken into account, it leads to misinterpretations as if there were faults in the structure. Rails are exposed to changing environmental conditions continuously. In this study, the behavior of the R260 rail steel at varying temperatures is investigated using the EMI method. As a result of the experimental studies, it has been observed that frequency and amplitude change with decreasing temperature. This change has been interpreted using damage metrics.

Keywords: EMI method, temperature effect, rail.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yapısal sağlık izleme (SHM); hasarın oluşmasından sonra hasarın tespitini, konumunu, büyüklüğünü ve yapının kalan ömrünü belirlemek için belirli stratejilerin uygulandığı bir süreçtir. SHM ile yapısal sistemin veya bileşenlerinin değişen yüklemeye ve/veya çevresel şartlarda tepkisi sürekli olarak ölçülür. SHM genellikle

Uygun bakım; bir yapının ömrünü uzatır ve ciddi arızaları önler. Yüksek işletme yükleri, tasarımların karmaşıklığının artması, değişen çevresel şartlar ve yapıların ömrünün uzun olması SHM'nin gerekliliği ve önemini arttırmıştır. Ülkelerin ekonomileri ulaşım altyapılarına (köprü, karayolu, demiryolu vb.) bağlıdır. Taşıma altyapısının optimum seviyede performans göstermemesi, ülkenin gayri safi yurtiçi hasılasını etkiler. Sürekli yüklenmenin ve çevrenin etkisinden dolayı yapıların mukavemeti azalır. Bu mukavemet

azalmasından dolayı yapının performansının yeterli olup olmadığı değerlendirilmelidir. Yapısal güç belirli bir eşik seviyesinin altına düşerse, ani bir arıza meydana gelebilir. Bu durum kazaya neden olabilir ve yapının kullanılabilirliğini etkiler. Yapıdaki değişimin erken tespit edilmesi çok önemlidir. Yapıda meydana gelen değişim zamanında tespit edilemezse yapının güvenliği için ciddi sonuçlar doğurabilir. Yapının mukavemetini etkileyen çeşitli durumlar söz konusudur. Bu durumlara maruz kalan yapının güvenliğinin güvence altına alınması gerekmektedir. Eğer yapılar düzenli veya sürekli olarak izlenirse yapının davranışı daha iyi anlaşılır. Bu da tasarım iyileştirme çalışmalarına katkı sağlar. Uygun SHM yöntemleri ile telafisi mümkün olmayan durumlar azaltılabilir ve böylece ülkelerin ekonomisinin gelişmesine katkı sağlanabilir. Yapı işlevini yerine getiremez duruma gelmeden önce meydana gelen hasar veya çatlaklar erken safhalarda belirlenirse uygun önlemler alınabilir. Köprülerin, yüksek binaların ve diğer önemli yapıların çöküşü, tren

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ghaydarlar@ogu.edu.tr

raylarından kaynaklanan kazalar ve hava araçlarında meydana gelen kazalar ülkenin ekonomik büyümesini engellemekte ve aynı zamanda insan kaynaklarının kaybedilmesine neden olmaktadır. Yapılar belirli bir ömür için tasarlanmıştır ve bu süre zarfında yapının düzgün bir şekilde işlevini yerine getirdiği varsayılmaktadır. Uygun SHM yöntemleri sayesinde yapının ömrünün uzatılması sağlanarak büyük tasarruflar yapılması mümkündür. SHM ile yapının performansı güvence altına alınabilir [3].

Elektromekanik empedans (EMI) tekniği, SHM için nispeten yeni bir tekniktir. EMI tekniğinde, piezoelektrik seramik sensör yaması, yüksek mukavemetli epoksi yapıştırıcı kullanarak sağlığı denetlenecek yapıya eklenir veya gömülür. Yamanın empedans karakteristiği, yüksek frekans aralığında (30-400 kHz) elde edilir. Bu karakteristik, yapısal sağlığın değerlendirilmesinde referans oluşturmaktadır. Herhangi bir zamanda yapının sağlığı değerlendirilmek istendiğinde, empedans karakteristiği tekrar elde edilir ve referans karakteristiği ile karşılaştırılır. Bağlanmış sensör yamasının karakteristiği, genellikle ticari olarak temin edilebilen empedans analizör vasıtasıyla elde edilir. Empedans analizör, önceden belirlenmiş frekans aralığı üzerinden bağlı / gömülü PZT dönüştürücüye 0,5/1 Voltluk bir alternatif voltaj sinyali uygular. Kararlı durum akımının büyüklüğü ve fazı, hiçbir dönüşüm yapmaya gerek olmadan doğrudan empedansın gerçek ve sanal kısmı şeklinde kaydedilir [3].

Literatürde SHM ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Siebel ve Lilov karbon fiber ile güçlendirilmiş plastik panellere (500mmx500mmx5mm) farklı boyutlarda kurşun-zirkonat-titanat (PZT) yamalar ekleyerek değişen sıcaklıklar için (-50°C ile 100°C) sıcaklık telafi algoritması maksimum kovaryans (CC) kullanarak hasarlı durum ve sıcaklık etkisini ayırt etmeye odaklanmışlardır. 50 kHz'e kadar aktif yüzey alanı büyük olan PZT yamalarda sıcaklık duyarlılığının daha yüksek olduğu, yüksek kusur hassasiyeti için düşük frekans bandının tercih edildiği ve büyük PZT yamaların kusur hassasiyetinin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır [4].

Baptista vd. yapısal sağlık izlemede elektromekanik empedans sinyalleri üzerinde sıcaklığın etkisini araştırmışlardır. Alüminyum numuneler kullanılarak 25°C ile 102°C aralığında empedans sinyalleri elde ettikten sonra frekans ve genlikteki değişimi deneysel olarak analiz etmişlerdir. Sıcaklık etkisini telafi etmek için frekans aralığı seçiminin önemli olduğunu, sağlığı izlenen yapıda yanlış tespitlerden kaçınmak için yeterli dar frekans bandı seçilmesi zorunluluğunu vurgulamışlardır [5].

Zou vd. fonksiyon üretici ve osiloskop yardımıyla gömülü PZT yamaları kullanarak mermer bloğunun farklı frekanslarda (1, 10, 100 ve 1000 Hz) harmonik sinyal girdisiyle değişen sıcaklıklarda (30, 40, 50, 60, 70 ve 80°C) algılanan sinyallerin genliğini incelemişlerdir. Düşük frekanslı sinyallerin sıcaklık değişimine karşı

daha hassas olduğu ve sıcaklık etkisinin telafi edilmesinin zorunlu olduğu sonucuna ulaşmışlardır [6].

Wadowski vd. karbon fiber ile güçlendirilmiş polimerlerin hasarlı ve hasarsız durumları için sıcaklık değişiminin elektromekanik empedansın gerçek kısmı (rezistans) üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sıcaklık değişiminin rezistans sinyallerinde frekans değişimine neden olduğunu inceledikleri tüm numunelerde gözlemlemişlerdir. Hasarlı yapının değişen sıcaklıklarda tespiti için çapraz korelasyon değişimi (CCD) değerlerini sıcaklık etkisini telafi ederek ve etmeyerek hesaplamışlardır [7].

Xu vd. yüzeye yapılandırılan piezoelektrik sensör ve yapı üzerinde sıcaklığın etkisini düşünerek admittansı tahmin etmek için spektral eleman metodu önermişlerdir. Artan sıcaklıkla admittans piklerinin sola kaydığını ve genliğin azaldığını gözlemlemişlerdir [8].

Haider vd. dairesel piezoelektrik sensörün değişen sıcaklıklarda (50°C-250°C) empedans ve admittansının sıcaklığa bağlı fonksiyonunu üretmişlerdir. Sensörün malzeme özelliklerindeki bozulmanın sıcaklığa bağlı etkisini, analitik model ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasıyla belirlenebileceği sonucuna ulaşmışlardır [9].

Empedans karakteristiklerinin yapıda kusur olmadığı sürece aynı kalması beklenir. Ancak değişen ortam sıcaklıklarına maruz kalan yapılarda bu karakteristikler değişir. Sıcaklık etkisi dikkate alınmazsa, yapıda kusur olmadığı halde varmış gibi yanlış yorumlamalara sebep olur. Yanlış tespitleri önlemek için sıcaklık etkisinin telafi edilmesi zorunludur [3].

Ray çeliğinin değişen sıcaklıklardaki davranışının tespit edilmesi önemlidir. Literatürde gerçek boyutlu ray çeliğinin değişen sıcaklıklardaki davranışını EMI yöntemi kullanarak inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma kapsamında ray çeliğinin değişen sıcaklıklardaki davranışı EMI yöntemi kullanılarak incelenmiştir ve korelasyon katsayısı sapması (CCDM) hasar metriği kullanılarak sıcaklık etkisi telafi edilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde deneysel yöntem ve hasar metrikleri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. Son bölümde sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2. DENEYSEL YÖNTEM ve HASAR METRİKLERİ (EXPERIMENTAL METHOD and DAMAGE METRICS)

2.1 Deneysel Yöntem (Experimental method)

10 mm çapında ve 0,5 mm kalınlığındaki PIC255 ürün kodlu piezoelektrik sensör, PI Ceramic firmasından temin edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda R260 ray çeliği kullanılmıştır. Bu ray çeliği hızlı tren demiryolu hatları üst yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır ve hattın yapımını gerçekleştiren firmadan temin edilmiştir. Çizelge 1'de R260 ray çeliğinin kimyasal bileşimi için elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 1. R260 ray çeliğinin kimyasal bileşimi (Chemical composition of R260 rail steel)

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Al | Cu | V | Co | Ti |
|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 0,71 | 0,28 | 1,052 | 0,015 | 0,032 | 0,04 | 0,004 | 0,013 | 0,001 | 0,021 | 0,001 | 0,002 | 0,0017 |

İlk olarak ray çeliğine piezoelektrik sensörün kurulum işlemi literatürdeki prosedürlere uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Ray çeliği yağ temizleyici ile temizlendikten sonra sensörün yapıştırılacağı yer işaretleyici kullanılarak belirlenmiş ve nötralizasyon işlemi uygulanmıştır. Sonra yüzey gazlı bezle silinerek kurutulmuştur. Sensörün yapıştırılacağı yere ince kaplama şeklinde katalist sıvısı damlatılmış ve kuruması için yeterli süre (yaklaşık 1,5 dakika) beklenmiştir. Yapıştırıcı damlası sensöre eklendikten sonra daha önceden konumu belirlenen yere hizalanmıştır. Piezoelektrik sensör ve ray çeliği arasında düzgün yapışmayı sağlamak için yeterli basınç uygulanmış ve yaklaşık 1 dakika kadar beklenmiştir. Yeterli yapışmanın sağlanması için oda sıcaklığında numuneler 24 saat bekletilmiştir [10-11]. Daha sonra piezoelektrik sensöre bakır kablo lehimlenmiştir. Şekil 1’de piezoelektrik sensör kurulum kiti gösterilmiştir.

**Şekil 1.** Piezoelektrik sensör kurulum kiti [10] (Piezoelectric sensor installation kit)

Şekil 2’de piezoelektrik sensör eklenmiş ray çeliği gösterilmiştir.

**Şekil 2.** Piezoelektrik sensör eklenmiş ray (Piezoelectric sensor attached to the rail steel)

Empedans ölçümü için ölçüm uçlarından biri sensöre lehimlenmiş olan bakır kabloya, diğeri ise numuneye tutturulmalıdır. Rayın kalınlığının fazla olmasından dolayı ölçüm ucu doğrudan ray çeliğine tutturulamamıştır. Bu sorun, bakır kablonun ray çeliğine mıknatıs yardımıyla sabitlenmesinden sonra (Şekil 3), ölçüm ucunun bakır kabloya tutturulması sayesinde çözülmüştür.

**Şekil 3.** Mıknatıs yardımıyla kablonun ray çeliğine eklenmesi (Attaching the cable to the rail steel using a magnet)

Sonraki adımda ray çeliğinin oda sıcaklığındaki empedans ölçümleri Keysight E4990A model empedans analizör kullanılarak 40-75 kHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Şekil 4’de gösterildiği gibi 49-50 kHz frekans aralığına odaklanılmıştır. Empedansın gerçek kısmı, sensör eklenmiş numunenin titreşim spektrumunu yansıtır. Bu yüzden ölçümlerde empedansın gerçek kısmına odaklanılmıştır.

**Şekil 4.** Ray çeliğinin oda sıcaklığındaki deneysel ölçümü (Experimental measurement of rail steel at room temperature)

Oda sıcaklığındaki ölçüm tamamlandıktan sonra, ray çeliği ARCTIKO LFE140 model laboratuvar tipi soğutucu içine bırakılmıştır. Soğutucu sırasıyla -10°C ve

-25°C'ye set edilmiş ve ray çeliğinin istenen sıcaklığa gelmesi için 2 gün beklenmiştir. Ray çeliği hedeflenen sıcaklıklara ulaştıktan sonra empedans ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

2.2 Hasar Metrikleri (Damage Metrics)

Hasar metrik değerleri, hasar indeksini gösteren skaler bir değerdir. Bu değer iki empedans spektrumunun işlenmesi sonucu ortaya çıkan farkı ifade eder. Bugüne kadar, empedans spektrumlarını karşılaştırmak ve hasar varlığını değerlendirmek için birçok hasar metriği kullanılmıştır. Bunlar arasında en çok kullanılan metrikler; ortalama kareler sapmasının karekökü (RMSD), ortalama mutlak yüzde sapma (MAPD), kovaryans (CC) ve korelasyon katsayısı sapmasıdır (CCDM). Bu metriklerin matematiksel ifadeleri Eşitlik 1-4 arasında gösterilmiştir [11].

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_N [Re(Z_i) - Re(Z_i^0)]^2}{\sum_N [Re(Z_i^0)]^2}} \quad (1)$$

$$MAPD = \frac{1}{N} \sum_N \left| \frac{Re(Z_i) - Re(Z_i^0)}{Re(Z_i^0)} \right| \quad (2)$$

$$CCDM = 1 - \frac{\sum_N [Re(Z_i) - \overline{Re(Z)}][Re(Z_i^0) - \overline{Re(Z^0)}]}{\sqrt{\sum_N [Re(Z_i) - \overline{Re(Z)}]^2 \sum_N [Re(Z_i^0) - \overline{Re(Z^0)}]^2}} \quad (3)$$

$$CC = 1 - CCDM \quad (4)$$

N örneklem nokta sayısını, üst olarak 0 yapının bozulmamış halini (referans halini), Z değerleri empedans değerlerini, \bar{Z} ve \bar{Z}^0 empedans değerlerinin ortalamalarını göstermektedir. Eşitlik 1-4'de skaler değerler üretilir. Bu değerler karşılaştırılan spektrum değerleri arasındaki ilişkileri ifade eder. Eşitlik 1-4'de girdi empedans spektrumlarının bir ön işleme ihtiyacı yoktur. Cihazdan ölçüm sonucu elde edilen veri doğrudan hasar metriklerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Öte yandan rezonans tepe değerlerinde frekans kaymalarının istatistiksel hasar indeksleri üzerine etkisi belirgin olmayabilir. Bu durumda doğru frekans bandının seçilmesi büyük önem taşır. Genellikle rezonans tepelerinin yoğun olduğu frekans bantlarının istatistiksel hasar indekslerinin hesaplanmasında kullanılması tavsiye edilir [11].

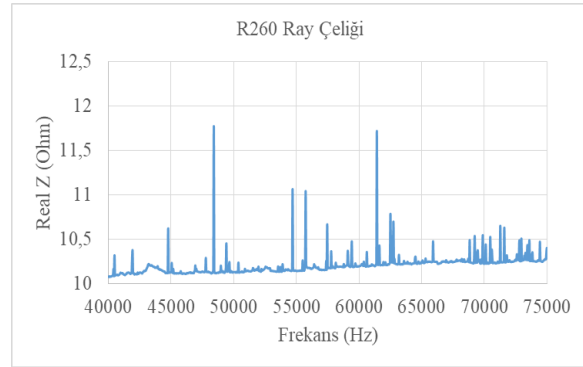
Efektif frekans kaydırma yöntemi sıcaklığın etkisini telafi etmek için basit bir yöntemdir ve çeşitli koşullar altında çok çeşitli yapılara uygulanabilir. Sıcaklık değişimine bağlı olarak elde edilen empedansı referans empedans ile kıyaslayarak minimum CCDM indeksi, maksimum korelasyon katsayısı elde edilene kadar (ideal olanı 1'dir) döngü oluşturularak frekans kaydırma işlemi gerçekleştirilir [12].

Bu çalışmada empedans grafiğinde sıcaklığın düşüşü sağa doğru kayma meydana getirirken bu durumu telafi

etmek için maksimum korelasyon katsayısı elde edilene kadar eğriler sola doğru kaydırılmıştır. Efektif frekans kaydırma yöntemi uygulanmıştır ve CCDM metriğine göre sıcaklık etkisi telafi işlemi gerçekleştirilmiştir. Hasar metrikleri olarak RMSD, MAPD ve CCDM kullanılmıştır.

3. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

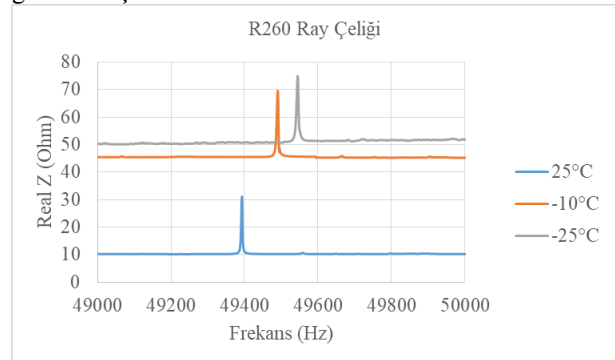
Ray çeliğinin empedans ölçümü ilk olarak 40-75 kHz frekans aralığında, 1000 adımda gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'de elde edilen sonuç gösterilmiştir.



Çizelge 2. Efektif frekans kaydırma yöntemi ile elde edilen frekans kayma miktarları (Hz) (The frequency shifts obtained by the effective frequency shift method)

| -10°C | -25°C |
|----------|-----------|
| 97,09710 | 151,15115 |

Şekil 5'de en yüksek gerçek empedans değerlerinin 49-50 kHz frekans aralığında olduğu açıkça görülmektedir. Bu yüzden oda sıcaklığı ve diğer sıcaklıklar için deneyler 49-50 kHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da değişen sıcaklıklar için elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 6. Ray çeliğinin değişen sıcaklıklardaki empedans ölçüm sonuçları (Impedance measurement results for the rail steel at varying temperatures)

Şekil 6'da görüldüğü gibi, sıcaklık düştükçe frekans sağa doğru kaymakta ve gerçek empedans değerleri de artmaktadır. Literatürdeki benzer çalışmalarda sıcaklık arttıkça frekansın sola kaydığı ve gerçek empedans

değerlerinin azaldığı gözlenmiştir [7-9]. Yapılan bu çalışmada da, sıcaklığın azalması ile aynı eğilim gözlenmiştir. Bu değişim oda sıcaklığındaki referans ölçümle karşılaştırılmış ve hasar metrikleri kullanılarak değişim yorumlanmıştır.

3.1. Hasar metrikleri açısından deneysel sonuçlar (Experimental results in terms of damage metrics)

Efektif frekans kaydırma yöntemiyle elde edilen frekans kayma miktarları Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2’de açıkça görüldüğü gibi, sıcaklık düştükçe frekans kayma miktarı artmıştır.

Ray çeliğinin sıcaklık etkisi telafi edilmemiş hasar metrik değerleri Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 3. Sıcaklık etkisi telafi edilmemiş hasar metrik değerleri (Temperature effect uncompensated damage metrics)

| | -10°C | -25°C |
|------|---------|---------|
| RMSD | 3,41000 | 3,95000 |
| MAPD | 3,43000 | 3,98000 |
| CCDM | 1,00947 | 1,01803 |

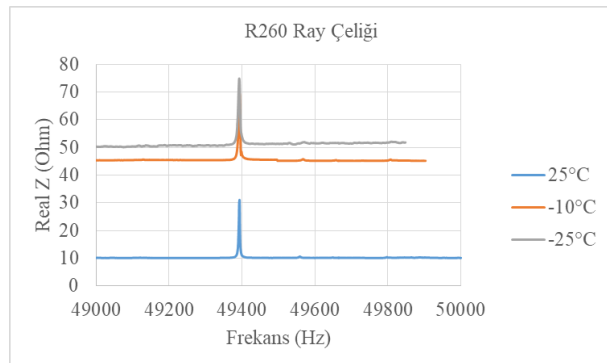
Sıcaklık azaldıkça hasar metrik değerlerinin arttığı Çizelge 3’de açıkça görülmektedir.

Efektif frekans kaydırma yöntemiyle elde edilen hasar metrik değerleri Çizelge 4’de verilmiştir.

Çizelge 4. Sıcaklık etkisi telafi edilmiş hasar metrik değerleri (Damage metric values where effect of temperature is compensated)

| | -10°C | -25°C |
|------|---------|---------|
| RMSD | 3,25000 | 3,67000 |
| MAPD | 3,19000 | 3,53000 |
| CCDM | 0,86559 | 0,89744 |

Hasar metrik değerlerinin sıcaklık etkisinin telafi edilmesi sonucunda azaldığı Çizelge 3 ve 4’de açıkça görülmektedir. Ray çeliğinin sıcaklık etkisi telafi edilmiş gerçek empedans sonuçları Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Sıcaklık etkisi telafi edilmiş gerçek empedans sonuçları (Temperature effect compensated real impedance results)

Elde edilen maksimum gerçek empedans değeri yaklaşık 74,90 Ohm civarındadır. Elde edilen rezonans frekansı ise yaklaşık 49392 Hz civarındadır.

Tüm sonuçlar incelendiğinde sıcaklık azalışı ile beraber gerçek empedans grafikleri sağa doğru kaymıştır. Sıcaklık değişimi arttıkça frekans kayma miktarı artmıştır. Bu grafikler sola doğru kaydırılarak sıcaklık etkisi telafi edilmiştir. Sıcaklık etkisi telafi edildikten sonra, hasar metrikleri değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Sıcaklık azalışı ile beraber gerçek empedans değerleri artmıştır. Bu kapsamda sonuçların literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür [5,7,8,9,13,14].

4. SONUÇ ve ÖNERİLER (RESULT and SUGGESTIONS)

Piezoelektrik sensörler yapılara eklenerek yapının sağlığının eş zamanlı olarak izlenmesini sağlarlar. Sıcaklığın piezoelektrik malzeme özelliklerini değiştirdiği bilinmektedir. Sıcaklık etkisi dikkate alınmazsa yapıda hata, kusur olmadığı halde varmış gibi yanlış yorumlamalara yol açabilir.

Bu çalışmada ray çeliğinin değişen sıcaklıklardaki davranışı EMI yöntemi kullanılarak incelenmiştir. -10°C ve -25°C’deki empedansın gerçek kısmındaki değişimler oda sıcaklığındaki ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılarak değerlendirme yapılmıştır. Sıcaklık düştükçe frekansın sağa kaydığı ve gerçek empedans değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu değişim CCDM hasar metriği kullanılarak telafi edilmiştir. Bu sayede rayda kusur olmadığı, değişimin sıcaklık etkisinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Ayrıca, sıcaklık düşüşü ile birlikte hasar metrik değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

Daha sonraki çalışmalarda sıcaklık aralığı daha geniş seçilerek çalışmalar yapılabilir. Ayrıca daha küçük ve büyük numuneler için deneyler tekrar edilerek boyut etkisi değerlendirilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından 201715A119 nolu proje olarak desteklenmiştir.

REFERANSLAR (REFERENCES)

- [1] Aktan A. E., Helmicki A. J. and Hunt V. J., “Issues in health monitoring for intelligent infrastructure”, *Smart Materials and Structures*, 7(5): 674-692, (1998).
- [2] Doebling S. W., Farrar C. R. and Prime, M. B., “A summary review of vibration-based damage identification methods”, *The Shock and Vibration Digest*, 30(2): 91-105, (1998).
- [3] Shankar R., “An integrated approach for structural health monitoring”, *PhD thesis*, Indian Institute of Technology Delhi, (2009).

- [4] Siebel, T. and Lilov, M., “Experimental investigation on improving electromechanical impedance based damage detection by temperature compensation”, *Key Engineering Materials*, 569: 1132-1139, (2013).
- [5] Baptista F. G., Budoya D. E., De Almeida V. A. and Ulson J. A., “An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring”, *Sensors (Basel)*, 14(1): 1208-1227, (2014).
- [6] Zou, D., Liu, T., Liang, C., Huang, Y., Zhang, F., Du, C., “An experimental investigation on the health monitoring of concrete structures using piezoelectric transducers at various environmental temperatures”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26(8): 1028-1034, (2015).
- [7] Wandowski T., Malinowski P. H. and Ostachowicz W. M., 2016, “Delamination detection in CFRP panels using EMI method with temperature compensation”, *Composite Structures*, 151: 99-107, (2016).
- [8] Xu G., Xu B., Xu C. and Luo Y., “Temperature effects in the analysis of electromechanical impedance by using spectral element method”, *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 12(1): 119-132, (2016).
- [9] Haider M. F., Giurgiutiu V., Lin B. and Yu L., “Irreversibility effects in piezoelectric wafer active sensors after exposure to high temperature”, *Smart Materials and Structures*, 26(9): 095019, (2017).
- [10] <http://www.vishaypg.com>, “Vishay Micro Measurements”, (2013).
- [11] Giurgiutiu V., “Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors”, Second Edition, *Elsevier*, U.S.A., (2014).
- [12] Rabelo, D.S., Steffen, V., Neto, R.M.F. and Lacerda, H.B., “Impedance-based structural health monitoring and statistical method for threshold-level determination applied to 2024-T3 aluminum panels under varying temperature”, *Structural Health Monitoring*, 16(4): 365-381, (2017).
- [13] Sepehry, N., Shamsirsaz, M. and Bastani, A., “Experimental and theoretical analysis in impedance-based structural health monitoring with varying temperature”, *Structural Health Monitoring*, 10(6): 573-585, (2010).
- [14] Sepehry, N., Shamsirsaz, M. and Abdollahi, F., “Temperature variation effect compensation in impedance-based structural health monitoring using neural networks”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22(17): 1975-1982, (2011).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Üç boyutlu kirişlerin doğrusal olmayan mekanik davranışı için *Mathematica* kullanarak sonlu elemanlar yöntemi uygulaması

Finite element method application for nonlinear mechanical response of three-dimensional beams using Mathematica

Yazar(lar)((Author(s)): Hakan TANRIÖVER

ORCID: 0000-0003-2020-2438

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Tanrıöver H., “Üç boyutlu kirişlerin doğrusal olmayan mekanik davranışı için *Mathematica* kullanarak sonlu elemanlar yöntemi uygulaması”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 961-966, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.439546

Üç Boyutlu Kirişlerin Doğrusal Olmayan Mekanik Davranışı için *Mathematica* Kullanarak Sonlu Elemanlar Yöntemi Uygulaması

Araştırma Makalesi / Research Article

Hakan TANRIÖVER*

Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Çankaya Üniversitesi, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 01.07.2018 ; Kabul/Accepted :07.01.2019)

ÖZ

Kirişlerin büyük dönmeler ve yer değiştirmeler altında mekanik davranışı incelendi. Crisfield tarafından verilen eş-dönüştü formülasyon yardımıyla üç boyutlu kiriş sonlu elemanları Mathematica yazılımı içerisinde modellendi. Mathematica yazılımının sembolik işlemcisi sayesinde modele ait parametreler değişken tutulabilir ve değişik geometrilerdeki kirişler kolayca modellenebilir. Doğrusal olmayan denklem takımları Newton-Raphson yöntemi ile çözüldü. Dinamik hareket denklemi ve sayısal zaman integrasyon yöntemi ortaya konuldu yalnız çözümler ileriye çalışmalara bırakıldı. Literatürdeki çalışmaların ve ANSYS programının sonuçlarıyla karşılaştırmalar yapıldı.

Anahtar Kelimeler: Üç boyutlu kiriş, Mathematica, doğrusal olmayan analiz.

Finite Element Method Application For Nonlinear Mechanical Response Of Three-Dimensional Beams Using *Mathematica*

ABSTRACT

Mechanical behavior of beams under large rotations and displacements was investigated. Using co-rotational approach given by Crisfield, three dimensional beam finite elements was modeled in Mathematica environment. The symbolic process of Mathematica provides keeping the parameters in the model as variables and beams having different geometries can be modelled easily. The yielding non-linear equation system was solved by utilizing Newton-Raphson technique. Dynamic balance equations and numerical time integration method were introduced, the solution process was left as a future work, however. Comparisons with the results of ANSYS and those of the works from the literature are accomplished.

Keywords: Three-dimensional beams, Mathematica, nonlinear analysis.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Esnek mekanizmalar, robot kolları, yaylar, uzay kafes sistemleri ve benzeri mühendislik uygulamalarında kullanılan üç boyutlu kiriş modellerinde büyük yer değiştirmelerin ve dönmelerin göz önüne alınmaları gerekir. Burada en büyük zorluklardan birisi dönme değişkenlerinin vektörel yapıya sahip olmamalarıdır [1]. Bazı araştırmacılar kirişteki dönmelerden gelen yer değiştirmeler ile şekil değiştirmelerden gelen yer değiştirmeleri ayrıştırılarak eş-dönüştü (co-rotational) bir formülasyon kullanmışlardır. Bu formülasyonda her elemana bağlı, eleman ile birlikte dönen fakat şekil değiştirmeyen bir kartezyen eksen takımı mevcuttur. Eş-dönüştü formülasyonu kullanarak kiriş elemanların modellemesini ilk olarak Oran ve Kassımalı [2] ile

Belytschko ve arkadaşları [3] yaptılar. Oran ve Kassımalı, iki boyutlu kirişlerin dinamik davranışını kiriş-kolon yaklaşımı ile açıkladıkları eş-dönüştü

formülasyon yardımıyla çözdüler. Bu çalışmalarında kirişe ait küçük şekil değiştirmeler için tanjant katılık matrislerini oluşturdu fakat çok büyük dönmeleri ele almadılar. Üç boyutlu kirişlerin, eş-dönüştü formülasyon kullanarak küçük şekil değiştirmeleri ve büyük dönmeleri için tanjant katılık matrislerinin oluşturulması ile doğrusal olmayan analizi, birkaç araştırmacı tarafından verilmiştir [3-5]. Bu formülasyon ile üç boyutlu kirişlerin büyük şekil değiştirmelerini de kapsayan bir çalışma Pai tarafından gerçekleştirilmiştir [6]. Le ve arkadaşları eş-dönüştü formülasyonunu sonlu elemanlar ve Newmark zaman adımı yöntemleri ile birlikte uygulayarak kirişlerin doğrusal olmayan dinamik davranışlarını çözümler [7]. Bu çalışmalarında Crisfield [4] tarafından verilen formülasyonun en iyi alternatif olduğunu belirtmişlerdir. Jonker ve arkadaşları Timoshenko kiriş modelinde doğrusal olmayan etkileri göz önüne alarak üç boyutlu kirişlerin sonlu elemanlar çözümünü yaptılar [8]. Üç boyutlu kirişlere ait başka formülasyonları içeren çalışmalar da literatürde bulunabilir [9-14].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : htanriover@canakaya.edu.tr

Bu çalışma kapsamında Crisfield tarafından verilen kirişlerin eş-dönümlü formülasyonu ele alınarak Mathematica yazılımında bir sonlu elemanlar modeli kuruldu. Literatürde verilen örnekler ile ve ANSYS yazılımı kullanılarak elde edilen sonlu elemanlar sonuçları ile karşılaştırmalar verildi.

2. DENKLEMLER (EQUATIONS)

Crisfield formülasyonu kullanılarak denge denklemlerinin elde edilmiş şekli aşağıda özetlenmiştir.

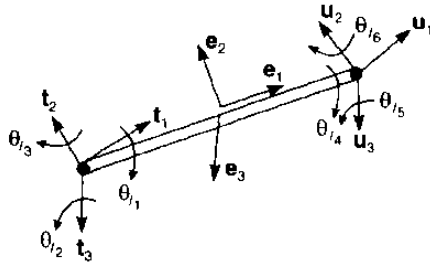
Elemanın her bir düğüm noktasında üç dönme ve üç yer değiştirme olmak üzere altı serbestlik derecesi vardır. Şekil 1.'de kiriş elemana ait yerel koordinat sistemi ve serbestlik dereceleri gösterilmiştir. Denklemlerde alt indis "i" yerel değişkenleri belirtmek için kullanılmıştır. Tekrar vurgulamak gerekirse yerel olarak eleman doğrusal olarak davranmaktadır, burada doğrusal olmayan davranış eş-dönümlü formülasyon aracılığıyla büyük dönmelerden gelmektedir.

Elemana ait yerel serbestlik dereceleri;

$$\mathbf{p}_i^T = (\mathbf{d}_{i1}^T, \theta_{i1}^T, \mathbf{d}_{i2}^T, \theta_{i2}^T) \quad (1)$$

$$\mathbf{d}_{ii}^T = (u_{ii}, v_{ii}, w_{ii}) \quad \{i = 1,2\} \quad (2)$$

olarak belirlenmiştir. Burada u, v, w sırasıyla yerel x, y ve z yönündeki yer değiştirmelerdir. Eleman üzerinde tanımlı birim vektörlerden \mathbf{e}_1 , birinci ve ikinci düğüm noktaları arasından geçen doğrultuda tanımlanmıştır ve



Şekil 1. Kiriş eleman ve serbestlik dereceleri (Beam element and the degrees of freedom) [4]

şu şekilde hesaplanabilir;

$$\mathbf{e}_1 = (\mathbf{x}_{21} + \mathbf{d}_{21})/l_n \quad (3)$$

Burada $\mathbf{x}_{21} = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1$ konum vektörü, $\mathbf{d}_{21} = \mathbf{d}_2 - \mathbf{d}_1$ yer değiştirme vektörü ve l_n elemanın son boyudur. Yerel düğüm kuvvetleri (\mathbf{q}_i) ile dönmeler (\mathbf{p}_i) arasında Euler-Bernoulli kiriş kabulleri kullanılarak doğrusal bir ilişki yazılabilir.

$$\mathbf{q}_i = \mathbf{K}_i \mathbf{p}_i \quad (4)$$

Örneğin kirişteki aksenal kuvvet (N) ve momentler (\mathbf{M}) aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$N = \frac{EA}{l_0} u_1, \quad \mathbf{M} = \mathbf{D}(\theta_i - \theta_{i0}) \quad (5)$$

Burada sıfır alt indisli ilk hali, $\mathbf{u}_i = l_n - l_0$ ve \mathbf{D} ise momentler ile eğimler arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Yerel ile genel serbestlik dereceleri arasında $\delta \mathbf{p}_i = \mathbf{F}^T \delta \mathbf{p}$ ilişkisi olduğunu düşünelim, yerel ve genel sistemlerde virtüel iş eşitlenerek;

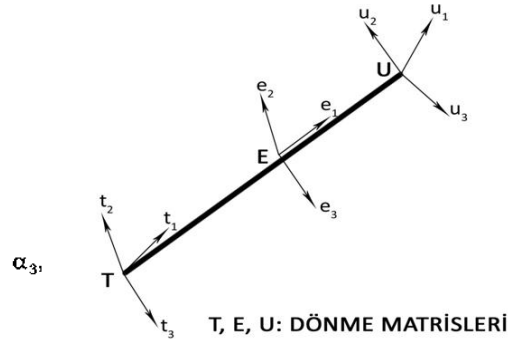
$$\mathbf{q}_i = \mathbf{F}^T \mathbf{q}_{ii} = \mathbf{F}^T \mathbf{K}_i \mathbf{p}_i \quad (6)$$

genel iç kuvvet vektörü \mathbf{q}_i bulunabilir. Buradan tanjant katılık matrisi \mathbf{K}_T

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{q}_i &= \mathbf{F}^T \delta \mathbf{q}_{ii} + \delta \mathbf{F}^T \mathbf{q}_{ii} \\ &= \mathbf{F}^T \mathbf{K}_i \delta \mathbf{p} + \mathbf{K}_{T\sigma} \delta \mathbf{p} = \mathbf{K}_T \delta \mathbf{p} \end{aligned} \quad (7)$$

şeklinde hesaplanabilir. Eleman üzerinde tanımlı yerel birim vektörler Şekil 2.'de açıkça görülmektedir. Burada E, U ve T dönme matrisleri, ilgili birim vektörlerin kolon halinde yazılmasıyla oluşturulmuştur. Tanjant katılığın ve bu dönme matrislerin adım adım nasıl hesaplandığı burada verilmeyecektir, ilgili bilgilere [4]'den ulaşılabilir.

Tanjant katılık matrisi, yapısı gereği simetrik değildir. Fakat sayısal deneyler, tanjant katılık matrisinin iterasyonlar sonucunda denge haline yaklaşıldıkça simetrik olma eğilimi taşıdığını göstermiştir [4]. Denge haline yakınsama Newton-Raphson yöntemi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Newton-Raphson yönteminde her iterasyon içerisinde genel serbestlik derecelerindeki değişim $\Delta \mathbf{p}$ aşağıdaki şekilde hesaplanır.



Şekil 2. Eleman üzerinde yerel üçlü birim vektörler (Local triads on the element)

$$\Delta \mathbf{p} = -\mathbf{K}_T^{-1}(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_e) \quad (8)$$

Burada, i ve e alt indisleri iç ve dış kuvvet vektörlerini göstermektedir. Bu noktada yakınsama kriteri sağlanmıyor ise serbestlik dereceleri güncellenir ve denge denklemleri tekrar çözülür. Geliştirilen Mathematica kodu, oldukça uzun olduğundan burada verilmemiştir, fakat gerekir ise yazardan temin edilebilir. İlgili kodun algoritması Ek'de görülebilir.

Kirişin dinamik davranışını çözmek için zamanda integrasyon yöntemlerinden birisi kullanılabilir. Genel halde bir adım sonunda dinamik denge hali;

$$(\mathbf{q}_{i,n+1} - \mathbf{q}_{e,n+1}) + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{d}}_{n+1} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{d}}_{n+1} = \mathbf{0} \quad (9)$$

şeklinde verilebilir. Burada \mathbf{M} kütle matrisi, \mathbf{C} sönüm matrisi ve \mathbf{d} yer değiştirme vektörüdür. Zaman integrasyonu olarak Newmark- β yöntemi kullanılırsa her adımda yer değiştirmeler ve hız vektörleri;

$$\mathbf{d}_{n+1} = \mathbf{d}_n + \Delta t \mathbf{\dot{d}}_n + \Delta t^2 ((1 - 2\beta) \mathbf{\ddot{d}}_n + 2\beta \mathbf{\ddot{d}}_{n+1})/2 \quad (10)$$

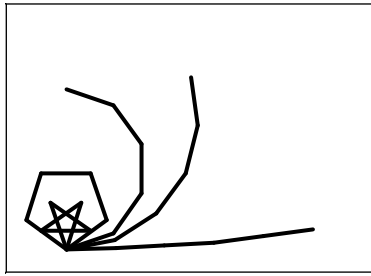
$$\mathbf{d}_{n+1} = \mathbf{d}_n + \Delta t ((1 - \gamma) \mathbf{\dot{d}}_n + \gamma \mathbf{\dot{d}}_{n+1}) \quad (11)$$

denklemleri yardımıyla bulunabilir. Yukarıdaki denklemler dinamik denge denklemine yerleştirilip tanjant katılık matrisi de kullanılarak;

$$\mathbf{q}_{i,n} - \mathbf{q}_{e,n+1} + \mathbf{K}_{t,n} \Delta \mathbf{d} + \mathbf{M} \left(\frac{4}{\Delta t^2} \Delta \mathbf{d} - \frac{4}{\Delta t} \mathbf{d}_n - \mathbf{\ddot{d}}_n \right) + \mathbf{C} \left(\frac{2}{\Delta t} \Delta \mathbf{d} - \mathbf{d}_n \right) = \mathbf{0} \quad (12)$$

eşitliği yazılabilir. Böylece her bir zaman adımında sanki statik doğrusal olmayan denklemler Newton-Raphson yöntemi ile çözülür. Bu çalışma kapsamında henüz dinamik problemlerin çözümüne ulaşılamamıştır. Aşağıda verilen örnekler yapılan statik çözümlere ait sonuçlardan oluşmaktadır.

3. SAYISAL ÖRNEKLER (NUMERICAL EXAMPLES)



Şekil 3. Sağ ucundan moment uygulanmış ankastre kiriş. Aynı grafik üzerinde eğilmiş olarak gösterilen kirişlere ait moment değerleri sağdan sola sırasıyla $0.025M^*$, $0.3M^*$, $0.5M^*$, M^* , $2M^*$. Burada, $M^* = \frac{ML}{2\pi EI}$ alınmıştır. (Cantilever beam subject to end moment)

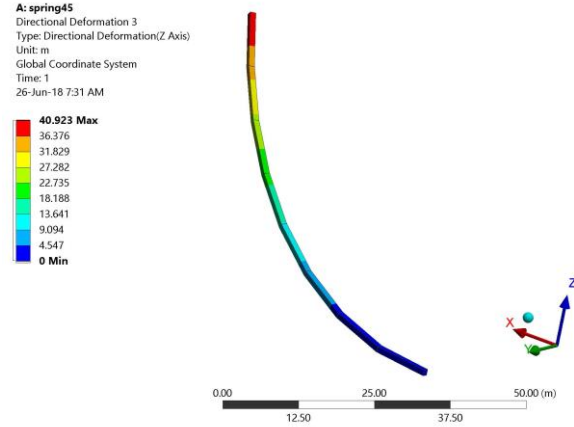
3.1 Örnek-1: Ucunda Moment Taşıyan Ankastre Bir Kiriş (Case-1: Cantilever Beam Subject to End Moment)

Sol ucunda ankastre mesnet olan düzgün bir kirişe sağ ucundan eğilme momenti uygulanıyor (bkz. Şekil 3.). Bu aslında iki boyutlu bir saf eğilme problemidir, fakat problem Crisfield'ın verdiği üç boyutlu formülasyon ile 5 eleman kullanılarak Mathematica ortamında çözdürülmüştür. Newton-Raphson yönteminde yakınsama kriteri $\epsilon = \frac{\|\mathbf{g}\|}{\|\mathbf{q}_e\|} < 1/1000$ olarak alındığında her adımda yalnızca 4 iterasyon gerekli olmuştur. Burada g dengeyi bozan kuvvet vektörü, qe ise dış kuvvet vektörünü göstermektedir.

3.2 Örnek-2: 45 Derecelik Yay

(Case-2: Forty-five Degree Bend)

Bir ucundan ankastre diğer ucundan yay düzlemine dik olacak şekilde kuvvet uygulanan 45 derecelik bir yay ele alınmıştır. Şekil 4.'de yay geometrisi gösterilmiştir. Birim kesit alana sahip yayın elastisite modülü 107 olarak alınmıştır ve yay sekiz eleman ile modellenmiştir. 600 birimlik yük 8 eşit adımda yüklenmiş ve her adımda 5 iterasyon yeterli olmuştur (bkz. Şekil 5.).

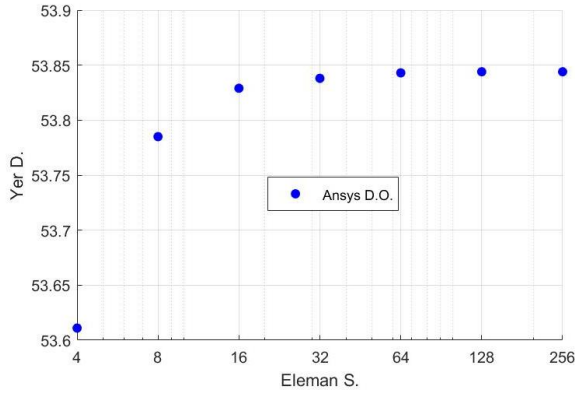


Şekil 6. 45 derecelik yayın 300 birim kuvvet altında deformasyonu ve z yönünde yer değiştirmesi (ANSYS) (Deformation of the 45 degree bend under load of 300 in z direction)

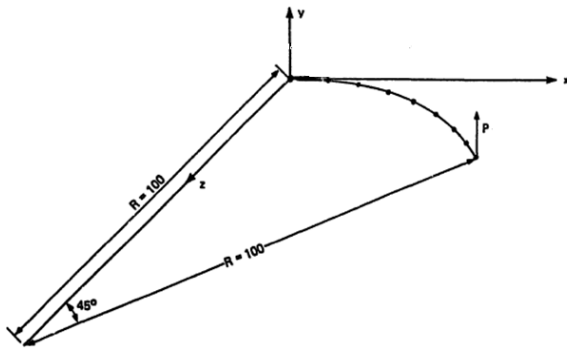
Aynı problem ANSYS programında BEAM188 tipindeki eleman kullanılarak da çözülmüştür (bkz. Şekil 6.). Yayın geometrisi ve mekanik özellikleri açısından kayma şekil değiştirmeleri ihmal edilebilir ve BEAM188 tipi elemanda kayma şekil değiştirmeleri kullanılmamıştır, böylece Crisfield formülasyonuna paralel olarak her düğüm noktasında 3 dönme 3 öteleme olmak üzere 6 adet serbestlik derecesi vardır. Sonlu eleman modelinde 8 eleman 17 düğüm noktası bulunmaktadır. ANSYS, 3 ara adım ve her adımda 7 iterasyon ile çözümleme yapmıştır. ANSYS programında doğrusal ve doğrusal olmayan analiz için ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Sonuçlar geliştirilmiş olan Mathematica kodu sonuçları ile karşılaştırılmış oldukça uyumlu oldukları görülmüştür (bkz. Çizelge 1. ve Şekil 7.). Bu analizde Mathematica komutlarının çalıştırılması için geçen süre 3.6 saniye sürmüştür. Aynı problem için ANSYS programında işlemler için 2.5 saniye geçtiği çözüm raporunda belirtilmiştir. Çözümleme süreleri açısından çok büyük farklar olmamakla birlikte, ANSYS programında her farklı geometri için sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasının getireceği ek süreler hesaba katılmalıdır. Yay probleminin sonlu elemanlar analizinde uygun sayıda eleman kullanılması için ağ hassasiyeti ölçülmüştür (bkz. Şekil 8.). Görüldüğü gibi daha doğru sonuçlar almak için eleman sayısını arttırmak gerekmektedir fakat bu çalışmada sonlu elemanlar

modellemesinin ağ yapısı üzerine detaylara girilmemiştir.

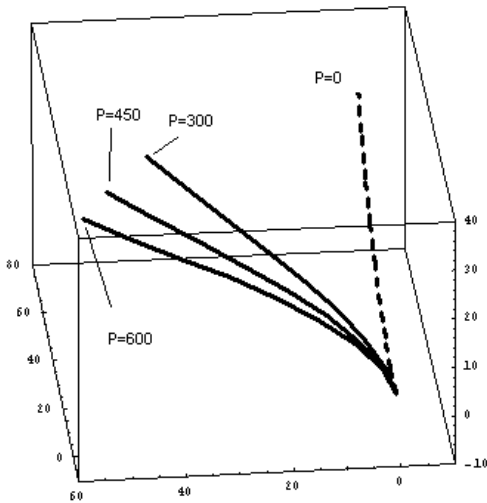
sayede yapısal optimizasyon kodları ile birlikte çalıştırılabilir. Hazır sonlu elemanlar programları kullanarak parametrelerin bu kadar kolay değiştirilmesi mümkün olmayabilir.



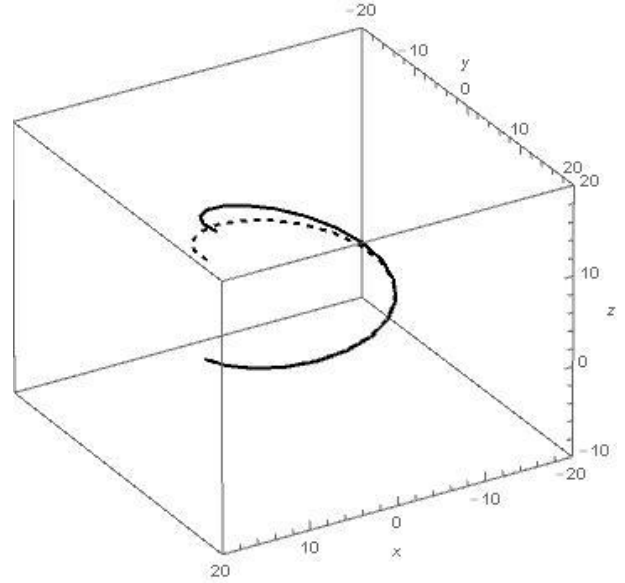
Şekil 8. Eleman sayısına bağlı olarak 45 derecelik yayın uç noktasının düzlem dışı yer değiştirme miktarlarının değişimi (Change in the out of plane displacement of the end point of 45 degree bend depending on the element number)



Şekil 4. 45 derecelik yay geometrisi [4] (45 degree bend geometry)



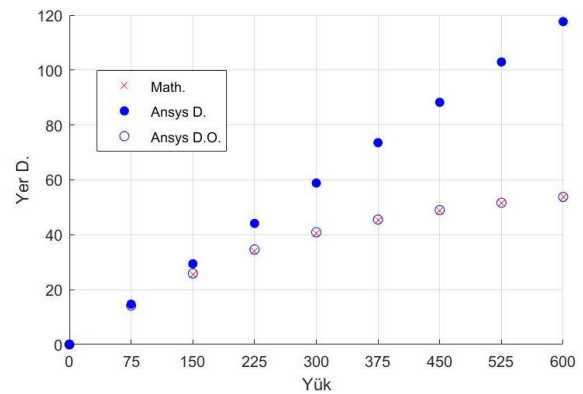
Şekil 5. 45 derecelik yayın ilk hali ve yüklenmiş halleri (Mathematica sonuçları) (Deformed and undeformed 45 degree bend)



Şekil 9. Ankastré bir tur yayın ilk ve yüklenmiş hali (Deformed and undeformed cantilever helical spring)

Çizelge 1. 45 derecelik yayın uç noktasının düzlem dışı yer değiştirme miktarı. Doğ.: Doğrusal, Doğ. O.: Doğrusal Olmayan. (Out of plane displacement of the end point of 45 degree bend)

| Yük | ANSYS (Doğ.) | ANSYS (Doğ. O.) | Mathematica |
|-----|--------------|-----------------|-------------|
| 300 | 58.837 | 40.923 | 40.533 |
| 450 | 88.256 | 48.997 | 48.788 |
| 600 | 117.670 | 53.785 | 53.710 |



Şekil 7. 45 derecelik yayın uç noktasının düzlem dışı yer değiştirme miktarları. Math.: Mathematica Sonuçları, Ansys D. ve D.O.: ANSYS Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Sonuçları. (Out of plane displacement of the end point of 45 degree bend)

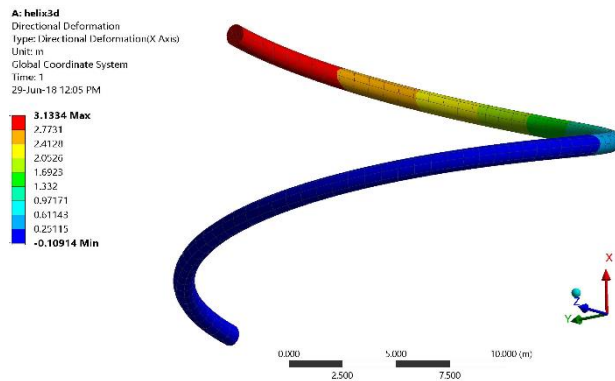
3.3. Örnek-3: Ankastr Helisel Yay

(Case-3: Cantilever Helical Spring)

Alt ucundan ankastr diğer ucundan helis eksenine doğrultusunda yukarı doğru çekilen bir yayın hem doğrusal hem de doğrusal olmayan statik davranışı 20 eleman kullanılarak modellenmiştir (Bknz. Şekil 9.). Burada Elastisite modülü 10^7 , helis çapı $R=10$ birim, yay çapı $d=1$ birim, helis eğimi 10 derece ve kuvvet 100 birim olarak alınmıştır. Yayın uç noktasının yer değiştirmeleri Çizelge 2.'de verilmiştir. Doğrusal çözümler için *Mathematica* ortamında ayrıca üç boyutlu doğrusal kiriş modellemesi yapılmıştır. Doğrusal olmayan çözümde tek yükleme adımı kullanılmıştır ve 7 iterasyon gerekmiştir. Yüklü halin geometrisi ayrıca Şekil 9.'da görülebilir. Karşılaştırma yapabilmek için ANSYS programında kiriş ve üç boyutlu elemanlar kullanarak analizler yapılmıştır. Burada bir boyutlu analiz için 20 BEAM188 tipi eleman ve 41 düğüm noktası, üç boyutlu analiz için (Bknz. Şekil 10.) SOLID186 tipi 924 eleman ve 4914 düğüm noktası kullanıldı. ANSYS programında doğrusal olmayan analizler için tek yükleme adımında BEAM188 eleman modeliyle 6, SOLID186 modeli ile 10 iterasyon gerçekleştirilmiştir. Beklenildiği gibi SOLID186 ile yapılan modelleme diğerlerine göre daha esnek davrandığı için ortaya çıkan yer değiştirmeler daha fazladır.

Çizelge 2. Yayın uç noktasındaki yer değiştirmeler (Displacements at the end point of the spring)

| Yer Değ. | Math. D./D.O. | BEAM188 D./D.O. | SOLID186 D./D.O. |
|----------|---------------|-----------------|------------------|
| u_x | -0.821422 | -0.840 | -0.943 |
| | -0.921413 | -0.881 | -1.024 |
| u_y | 0.37414 | 0.335 | 0.400 |
| | 0.35634 | 0.419 | 0.370 |
| u_z | 3.12548 | 3.132 | 3.356 |
| | 2.97771 | 2.938 | 3.133 |



Şekil 10. Ankastr bir tur yayın yüklenmiş hali ve helis eksenine boyunca yer değiştirmeleri (ANSYS-SOLID186) (Deformed cantilever spring and the displacements along the helical axis)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Büyük dönmeleri ve yer değiştirmeleri göz önüne alan Crisfield tarafından verilmiş formülasyon kullanılarak üç boyutlu kirişlerin statik davranışı incelendi. Üç boyutlu kiriş sonlu elemanları eş-dönümlü formülasyon yardımıyla *Mathematica* paket yazılımı içerisinde modellendi. Doğrusal olmayan denklemler Newton-Raphson yöntemi ile çözüldü. Kirişe ait dinamik denklemler ortaya konuldu fakat çözümlenmedi, bu konu üzerinde halen çalışılmaktadır. *Mathematica* sembolik işlemleri sayesinde formülasyonlar kolaylıkla elde edilebilmiş, hızlı bir şekilde programlama süreci tamamlanmıştır. Elde edilen sonuçların literatürdekiler ile ve ANSYS paket programı sonuçlarıyla uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Burada Euler-Bernoulli kiriş modeli kullanılmıştır, ince kesitli ve yüksek elastisite modüllü kirişlerin örneklerde olduğu gibi oldukça iyi modellendiği görülmüştür. Kalın kesitli ve düşük elastisite modüllü kiriş uygulamaları için kayma deformasyonunu ele alan modellerin kullanılması daha uygun olacaktır. Bu çalışmanın getirdiği avantajlardan birisi de elde edilen *Mathematica* modülünün sembolik işlem kapasitesi sayesinde istenen parametre hızlıca değiştirilip problem tekrar tekrar çözdürülebilir. Bu sayede yapısal optimizasyon kodları ile birlikte çalıştırılabilir. Hazır sonlu elemanlar programları kullanarak parametrelerin bu kadar kolay değiştirilmesi mümkün olmayabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

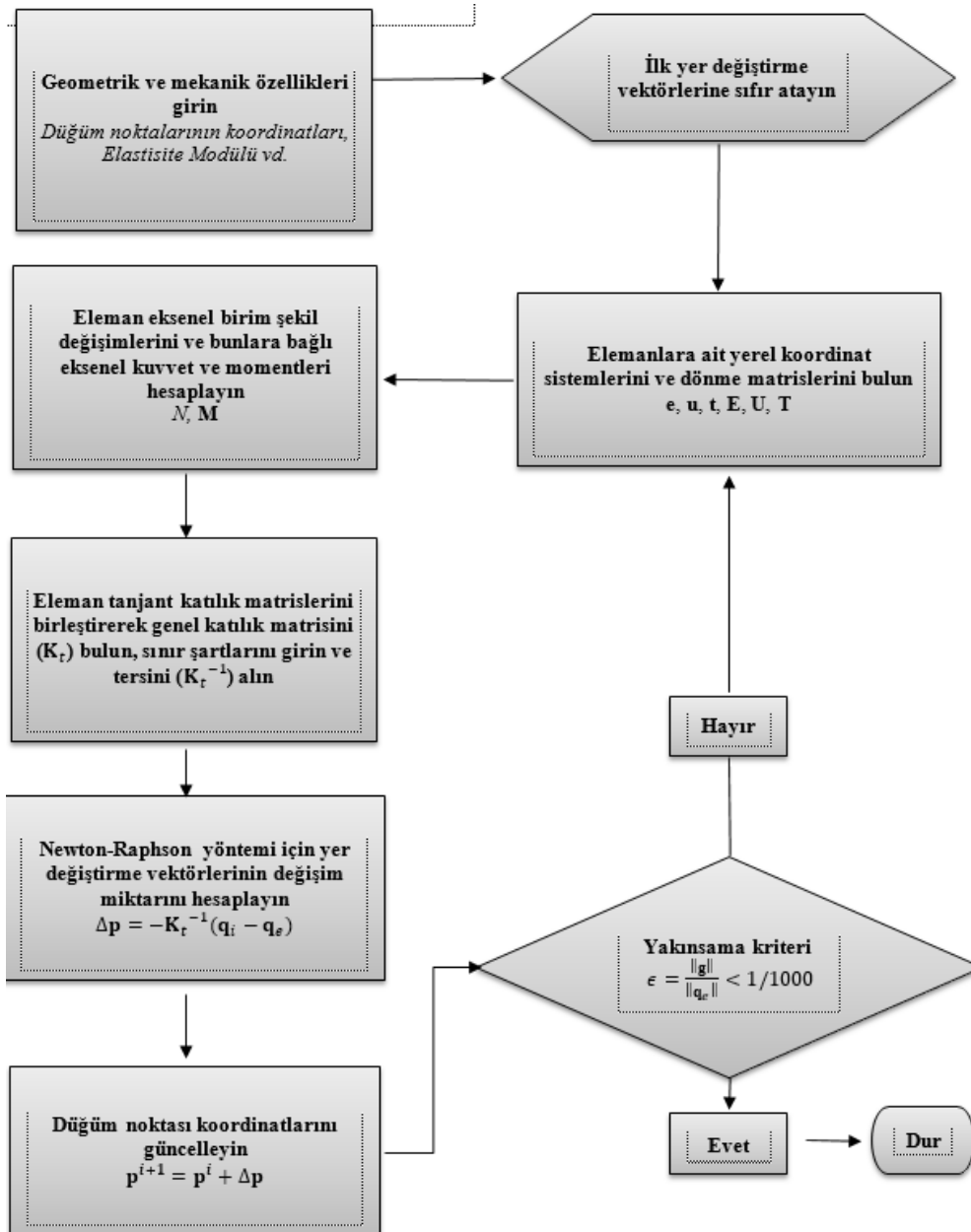
- [1] Argyris J., "An excursion into large rotations", *Comp. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 32: 85–155, (1982).
- [2] Oran C. and Kassýmali A., "Large deformations of framed structures under static and dynamic loads", *Computers & Structures*, 6: 539–547, (1976).
- [3] Belytschko T., "Large displacement, transient analysis of space frames", *Int. J. for Num. Meth. in Engrg.*, 11: 65–84, (1977).
- [4] Crisfield M.A., "A consistent co-rotational formulation for non-linear, three-dimensional, beam-elements", *Comp. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 81: 131–150, (1990).
- [5] Hsiao K.M., Lin J., Lin W.Y., "A consistent co-rotational finite element formulation for geometrically nonlinear analysis of 3-D beams", *Comp. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 169: 1–18, (1999).
- [6] Pai P.F., "Large deformation tests and total-Lagrangian finite-element analyses of flexible beams", *Int. J. of Solids and Structures*, 37: 2951–2980, (2000).
- [7] Le T.-N., Battini J.-M., Hijiaj M., "Dynamics of 3D beam elements in a corotational context: A comparative study of established and new formulations", *Finite Elements in Analysis and Design*, 61: 97-111, (2012).
- [8] Jonker J.B., "A geometrically nonlinear formulation of three-dimensional beam element for solving large deflection multibody system problems", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 53: 63-74, (2013).

- [9] Bathe K.-J., "Large displacement analysis of three-dimensional beam structures", *Int. J. For Num. Meth. in Engrg.*, 14: 961-986, (1979).
- [10] Simo J.C., "A finite strain beam formulation. The three dimensional dynamic problem, Part-I", *Comp. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 49: 55-70, (1985).
- [11] Rhim J. and Lee S.W., "A vectorial approach to computational modelling of beams undergoing finite rotations", *Int. J. for Num. Meth. in Engrg.*, 41: 527-540, (1998).
- [12] Le T.-N., Battini J.-M., Hijiaj M., "A consistent 3D corotational beam element for nonlinear dynamic analysis of flexible structures", *Comp. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 269: 538-65, (2014).
- [13] de Miranda S., Madeo A., Melchionda D., Patruno L. and Ruggerini A.W., "A corotational based geometrically nonlinear Generalized Beam Theory: buckling FE analysis", *Int. J. Solids and Structures*, 121: 212-227, (2017).
- [14] Cho H., Kim H., Shin S., "Geometrically nonlinear dynamic formulation for three-dimensional co-rotational solid elements", *Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg.*, 323: 301-320, (2018).

EK (APPENDIX)

Mathematica Kodunun Algoritması

(Algorithm of the Mathematica Code)





POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Farklı oranlarda etanol ve metanol katkısının tam yük altında dört silindirli dizel bir motorun performans ve emisyon değerlerine olan etkilerinin sayısal olarak incelenmesi

Numerical investigation of the effects of different percentage ethanol and methanol addition on performance and emission values of a four cylinder diesel engine at full load

Yazar(lar) (Author(s)): Fatih AKTAŞ¹, Salih KARAASLAN², Merthan KILIÇ³, Nuri YÜCEL⁴

ORCID¹: 0000-0002-1594-5002

ORCID²: 0000-0001-7957-2041

ORCID³: 0000-0003-1697-5868

ORCID⁴: 0000-0001-9390-5877

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Aktaş F., Karaaslan S., Kılıç M. ve Yücel N., “Farklı oranlarda etanol ve metanol katkısının tam yük altında dört silindirli dizel bir motorun performans ve emisyon değerlerine olan etkilerinin sayısal olarak incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 967-977, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.492979

Farklı Oranlarda Etanol ve Metanol Katkısının Tam Yük Altında Dört Silindirli Dizel Bir Motorun Performans ve Emisyon Değerlerine Olan Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Fatih AKTAŞ^{1*}, Salih KARAASLAN¹, Merthan KILIÇ², Nuri YÜCEL¹

¹Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

²TR Motor Güç Sistemleri Sanayi A.Ş, Hacettepe Teknokent F Blok Kat 1-2-3, Çankaya, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 06.12.2018 ; Kabul/Accepted : 20.01.2019)

ÖZ

Dizel motorlarda farklı oranlarda biyodizel yakıt kullanılması belirli motor çalışma koşullarında fazla performans kayıplarına yol açmadan egzoz emisyonlarının azaltılması için oldukça iyi bir yöntemdir. Birçok ülkede ise %5 biyodizel yakıt katkısı zorunlu hale gelmiştir ve bu oran bazı ülkelerde çok daha fazladır. Bu çalışmada da dört silindirli dizel bir motorda %5, %10 ve %15 etanol ve metanol katkısının motor performansı ve emisyonlar üzerine olan etkileri AVL Boost v2018.1 yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Analizler neticesinde elde edilen sonuçlar değerlendirilecek olursa; %5, %10 ve %15 hacimsel oranlarındaki etanol katkısında saf dizel yakıt kullanımına göre güçteki düşüş oranları sırasıyla maksimum %5, %4 ve %5 iken, aynı hacimsel orandaki metanol katkılı yakıt karışımında ise bu oranlar %5, %5 ve %8 olmaktadır. Benzer şekilde NO_x oluşumunda etanol katkısı ile azalma oranları maksimum %25, %27 ve %28 değerlerini alırken bu oran metanol katkısı ile %27, %28 ve %30 şeklinde gerçekleşmiştir. İS oluşumunda ise hem etanol hem de metanol kullanımında hıza bağlı olarak değişken bir davranış gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Etanol, metanol, dizel motor, AVL Boost.

Numerical Investigation of the Effects of Different Percentage Ethanol and Methanol Addition on Performance and Emission Values of a Four Cylinder Diesel Engine at Full Load

ABSTRACT

The use of different rates of biodiesel fuel in diesel engines is a very effective method for reducing exhaust emissions without causing excessive performance losses under certain engine operating conditions. In many countries, 5% biodiesel fuel contribution has become mandatory, and this ratio is much higher in some countries. In this study, addition of 5%, 10% and 15% ethanol and methanol to diesel fuel on engine performance and emission behaviour in a four-cylinder diesel engine were investigated using AVL Boost v2018.1 software. When 5%, 10% and 15% of ethanol is added to diesel fuel, the power is dropped 5%, 4% and 5% compare to pure diesel usage, respectively. In the addition of methanol, these percentages were become 5%, 5%, and 8%. With the addition of ethanol, the NO_x reduction rates are 25%, 27%, and 28%, respectively. In the usage of methanol, these emissions were reduced 27%, 28%, and 30%, respectively. In the formation of soot, both ethanol and methanol use has been found to vary depending on the engine speed.

Keywords: Ethanol, methanol, diesel engine, AVL Boost.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan nüfus sayısı ile birlikte araç sayıları da artmakta ve buna bağlı olarak ihtiyaç duyulan enerji miktarı da artmaktadır. Enerji ihtiyaçları ise özellikle ulaşım araçlarında fosil kökenli kaynaklardan sağlanmaya devam edilmektedir. Bu durumda da çevreye salınan petrol kökenli kirletici emisyonlar artmaktadır. Zararlı emisyonların miktarındaki artış hükümetlerin çok sıkı

kısıtlayıcı önlemler almalarını zorunlu kılmaktadır. Aynı zamanda, artan yakıt tüketimi alternatif yakıtların aranmasında artışa neden olmaktadır. Bu alternatif yakıtların başında etanol, metanol, singaz vb. yakıtlar gelmektedir. Birçok ülkede %5 alternatif yakıtın katkısı zorunludur ve çoğu otomotiv şirketi bu katkı oranlarını destekleyen motorlar üretmektedir. Dizel motorlarda farklı yakıtlar için AVL Boost programı ile yapılan sayısal çalışmalarla birlikte bazı deneysel çalışmalara örnekler aşağıda verilmiştir.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : fatihaktas@gazi.edu.tr

Wojs vd.(2015) 6 silindirli dizel bir motorda dizel-propan gaz karışımı kullanarak farklı enjeksiyon kademeleri için AVL Boost programı yardımıyla performans ve emisyon incelemelerinde bulunmuşlardır. Elde edilen sonuçlara göre silindir içi basıncın yükseldiği ve yanma süresinin uzadığını saptamışlardır [1]. Kaewpradap vd.(2013) tek silindirli dizel bir motorda %50 yük konumu için deneysel olarak silindir içi sıcaklık, basınç, ısı salınım oranı ve valf kalkış yüksekliğini elde ederek bu verileri tek boyutlu AVL Boost programında doğrularak termodinamik bir model elde etmişlerdir. Elde edilen bu termodinamik model sayesinde de farklı karışım oranlarında çift yakıt çalışmaları yaparak önerilerde bulunmuşlardır [2]. Huong vd.(2012) tek silindirli dizel bir araştırma motorunda biyokütle gazlaştırma sonucunda elde edilen singazın dizel yakıt ile birlikte yakılmasında enjeksiyon stratejilerinin performansa ve emisyonlara olan etkilerini AVL Boost kullanarak sayısal olarak incelemiştir. Yapılan iyileştirme çalışmalarının sonucunda motor gücünde ve NO_x salınımında azalma, CO ve is emisyonlarında artma gözlemlenmiştir. Ayrıca pilot enjeksiyon stratejisinin singaz/dizel çift yakıt kullanımında en iyi emisyon düşürücü olduğu saptanmıştır [3]. Aldhaidhawi vd.(2017) 4 silindirli direkt enjeksiyonlu dizel bir traktör motorunda 1400 devir/dak'da ve 2400 devir/dak'da biyodizel ve hidrojen katkısının motor performans ve emisyonlara olan etkilerini deneysel ve AVL Boost programı kullanarak sayısal olarak incelemiştir. Dizel yakıtı katılan %20 oranında kolza tohumu metil esteri ve emme manifolduna farklı oranlarda (%0 ile %5 arasında) hidrojen katkısı ile CO, is, yanmamış hidrokarbon emisyonları azalırken NO_x emisyonlarında bir miktar artış olduğu gözlemlenmiştir [4]. Praptijanto ve ark.(2015) yaptıkları çalışmada dikey iki silindirli dizel bir motorda E0, E2.5, E5, E7.5 ve E10 oranlarında etanol karışımı kullanarak özellikle 1400 devir/dak'da ve 0, 10, 20, 30, 40, 50 ve 60 Nm motor yüklerinde AVL Boost programı yardımıyla sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında etanol karışımının CO, is ve NO_x emisyonlarını düşürdüğü sonucuna ulaşmışlardır [5].

Yapılan çalışmada literatürden alınan deneysel verilerin bir-boyutlu AVL Boost programı yardımıyla doğrulama çalışmaları yapılmış ve elde edilen kalibrasyon faktörlerinden de yararlanarak saf dizel yakıt (DE0, DM0), %5 etanol ve metanol katkılı yakıt (DE5, DM5), %10 etanol ve metanol katkılı yakıt (DE10, DM10) ve %15 etanol ve metanol katkılı yakıt (DE15, DM15) karışımlarının motor performansına, yakıt tüketimine ve emisyon değerlerine olan etkileri incelenmiştir.

2. SİMULASYON TEORİSİ (SIMULATION THEORIES)

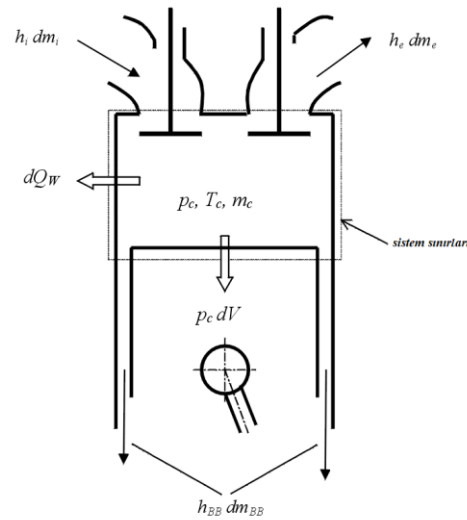
AVL Boost programı, temelde gaz dinamiği denklemlerinden faydalanılarak modellenen problemlere bir-boyutlu olarak yaklaşık çözümler sunmaktadır. Bu da denklemlerin çözümlerinden elde edilen sıcaklıkların,

basınçların ve akış hızlarının boruların enine kesiti üzerinde ortalama değerleri temsil ettiği anlamına gelmektedir. Ayrıca motorun herhangi bir parçasında üç boyutlu etkilerden kaynaklanan kayıpları en aza indirmek için uygun akış kayıp katsayıları tanımlanarak hata payını da azaltarak gerçekçi çözümler sunabilmektedir. AVL Boost programının tanımlanan şartları çözerken kullandığı temel korunum denklemleri, termodinamik ve ısı transferi modelleri, teori ve kullanıcı kitapçıklarından da [6,7] faydalanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir.

2.1 Temel Korunum Denklemleri (Basic Conservation Equations)

Termodinamiğin birinci yasası, piston çalışmasını, yakıt yanmasından ısı salınımını, yük arasındaki ısı değişimini, silindir duvarını, piston - piston başını, emme ve egzoz valfleri arasındaki entalpi akışını ve blow-by nedeniyle entalpi akışını dikkate alarak termodinamik durumu hesaplamak için kullanılır. Şekil-1 yukarıda belirtilen akışı göstermektedir. Termodinamiğin 1. yasasına göre silindirin termodinamik durum hesabı Eş. 1'deki gibidir:

$$\frac{d(m_c \cdot u)}{d\alpha} = -p_c \cdot \frac{dV}{d\alpha} + \frac{dQ_F}{d\alpha} - \sum \frac{dQ_w}{d\alpha} - h_{BB} \cdot \frac{dm_{BB}}{d\alpha} + \sum \frac{dm_i}{d\alpha} \cdot h_i - \sum \frac{dm_e}{d\alpha} \cdot h_e - q_{ev} \cdot f \cdot \frac{dm_{ev}}{dt} \quad (1)$$



Şekil 1. Silindir enerji dengesi (Cylinder energy balance) [6]

Eş. 1'de, $\frac{d(m_c \cdot u)}{d\alpha}$ silindirdeki iç enerji değişimini, $-p_c \cdot \frac{dV}{d\alpha}$ pistonun yaptığı işi, $\frac{dQ_F}{d\alpha}$ yakıtın sağladığı enerjiyi, $\sum \frac{dQ_w}{d\alpha}$ duvarlara olan ısı kayıplarını, $h_{BB} \cdot \frac{dm_{BB}}{d\alpha}$ krank bölgesine geçen entalpiyi, dm_i emme portundan silindire giren kütle, dm_e egzoz portundan çıkan kütle, h_i ve h_e giren ve çıkan kütlelerden kaynaklı entalpileri, q_{ev} yakıt buharlaşma ısısını, f silindirden çekilen buharlaşma ısısı oranı ve m_{ev} ise buharlaşan yakıt miktarını ifade etmektedir.

Silindirdeki kütle değişimi ise Eş.2'deki gibi hesaplanır:

$$\frac{dm_c}{d\alpha} = \sum \frac{dm_i}{d\alpha} - \sum \frac{dm_e}{d\alpha} - \sum \frac{dm_{BB}}{d\alpha} + \frac{dm_{ev}}{dt} \quad (2)$$

Eş. 2’de, $\frac{dm_c}{d\alpha}$ silindirdeki kütle değişimini, $\frac{dm_i}{d\alpha}$ silindire emme portundan giren kütle, $\frac{dm_e}{d\alpha}$ silindirden egzoz portundan çıkan kütle, $\frac{dm_{BB}}{d\alpha}$ krank bölgesine sızan kütle, m_{ev} ise buharlaşan yakıt kütle miktarını ifade etmektedir.

Eş. 1’de görüldüğü üzere yüksek basınç döngüsü için termodinamiğin birinci kanunu, silindirdeki iç enerji değişiminin pistonun yaptığı iş toplamının, yakıt ısı girdisi, duvar ısı kayıpları ve kartere sızan entalpi kayıplarının toplamına eşittir. Eş. 1 silindir içerisinde ve silindir dışarısında karışım hazırlama özelliğine sahip motorlar için geçerlidir. Silindir içerisinde (dizel motorlar) gerçekleşen karışımlar için yapılan kabuller:
i) Silindir içerisine eklenen yakıt ani olarak yanmaktadır,
ii) Yanma ürünleri, silindirde geri kalan dolgu ile aniden karışır ve homojen bir karışım oluşturur,
iii) Sonuç olarak, çevrimin H / Y oranı yanmanın başlangıcındaki yüksek değerden yanmanın sonuna kadar azalarak devam eder.

Gaz denklemi (Eş. 3) ele alındığında basınç, sıcaklık ve yoğunluk arasında ilişki kurulabilir.

$$p_c = \frac{1}{V} \cdot m_c \cdot R_0 \cdot T_c \quad (3)$$

Silindir içi sıcaklıklar Eş. 1’in Runge-Kutta metoduyla çözülmesiyle hesaplanabilmekte, böylelikle silindir içi sıcaklığın bilinmesi ile ideal gaz denklemi (Eş. 3) yardımıyla silindir içi basınç değerleri elde edilebilmektedir. Eş.3’te, p_c silindir içi basıncı, m_c silindir içerisindeki kütle, R_0 gaz sabitini, T_c ise silindir içi sıcaklığı temsil etmektedir.

2.2 Isı Transferi Modeli (Heat Transfer Model)

Yanma odasının duvarlarına yani silindir kafasına, piston ve silindir gömleğine olan ısı transferi Newton’un ısı transferi modeli ile şu şekilde hesaplanır:

$$Q_{wi} = A_i \cdot \alpha_w \cdot (T_c - T_{wi}) \quad (4)$$

Eş. 4’de, Q_{wi} duvar ısı akışını, A_i yüzey alanını, α_w ısı transfer katsayısını, T_c silindir içerisindeki gaz sıcaklığını, T_{wi} duvar sıcaklığını temsil etmektedir. Silindir gömleğinin sıcaklık dağılımı ise pistonun üst ölü nokta (ÜÖN) ve alt ölü nokta (AÖN) arasındaki eksenel sıcaklık değişimi dikkate alınarak hesaplanmaktadır:

$$T_L = T_{L,TDC} \cdot \frac{1 - e^{-c \cdot x}}{x \cdot c} \quad (5)$$

$$c = \ln \left(\frac{T_{L,TDC}}{T_{L,BDC}} \right) \quad (6)$$

Eş. 5 ve 6’da, T_L gömlek sıcaklığını, $T_{L,TDC}$ üst ölü noktadaki gömlek sıcaklığını, $T_{L,BDC}$ alt ölü noktadaki gömlek sıcaklığını, x ise piston konumunun fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Isı transfer katsayısı α_w ’nin hesaplanması için 6 farklı model kullanılmaktadır: Woschni 1978, Woschni 1990, Hohenberg, Lorenz, Avl 2000, Bargende. Çözümlemelerde kullanılan ısı transferi modeli Woschni 1978’dir. Yüksek basınç döngüsü için 1978 yılında yayınlanan Woschni modeli [8] şöyle özetlenmiştir:

$$\alpha_w = 130 \cdot D^{-0.2} \cdot p_c^{0.8} \cdot T_c^{-0.53} \cdot \left[C_1 \cdot C_m + C_2 \cdot \frac{V_D \cdot T_{c,1}}{p_{c,1} \cdot V_{c,1}} \cdot (p_c - p_{c,0}) \right]^{0.8} \quad (7)$$

Eş. 7’de, $C_1 = 2.28 + \frac{0.308 c_u}{c_m}$ dir. c_u çevresel hızı, c_m ise ortalama piston hızını ifade etmektedir. C_2 katsayısı ise direkt enjeksiyonlu motorlarda 0.00324 alınmaktadır. D silindir çapını, V_D silindir başına yer değiştirme hacmini, $p_{c,0}$ soğuk çevrimdeki silindir içi basıncı, $T_{c,1}$ emme supabı kapalı durumdaki silindir içerisindeki sıcaklığı, $p_{c,1}$ emme supabı kapalı olduğu durumdaki basınç değerini temsil etmektedir.

2.3 Yanma Modeli (Combustion Model)

AVL Boost programı alt yapısında tanımlı olan birçok farklı yanma modeli ile ısı salınım oranlarını doğru bir şekilde tayin etmeye çalışmaktadır. Programın yanmanın temsili için kullandığı modeller; Ön Tanımlı Isı Salınımı Modelleri, Hesaplanan Isı Salınımı Modelleri, Ön Tanımlanmış Basınç Eğrisi ile Yanma Analizi, İdeal Isı Salınımı Modeli, Kullanıcı Tanımlı Isı Salınımı Modeli ve bu modellerin birçok alt modellerinden oluşmaktadır. Bu çalışmada ise Hesaplanan Isı Salınımı Modelinin alt modeli olan MCC (Mixing Controlled Combustion) modeli kullanılmıştır.

2.3.1 MCC (Mixing Controlled Combustion) modeli (MCC Model)

Karışım Kontrollü Yanma (MCC) [9,10] modeli, direkt enjeksiyonlu sıkıştırma ateşlemeli motorlarındaki yanma karakteristiklerini öngörmek için kullanılır. Bu modelde yanma, önceden karıştırılmış ve difüzyon kontrollü yanma süreçleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır:

$$\frac{dQ_{total}}{d\alpha} = \frac{dQ_{MCC}}{d\alpha} + \frac{dQ_{PMC}}{d\alpha} \quad (8)$$

Burada ifade edilen karışım kontrollü yanma modeli Eş. 9’deki gibi ifade edilebilir. Bu rejimde, ısı salınımı mevcut yakıt miktarının (f_1) ve türbülanslı kinetik enerji yoğunluğunun (f_2) bir fonksiyonudur:

$$\frac{dQ_{MCC}}{d\alpha} = C_{Comb} \cdot f_1(m_F, Q_{MCC}) \cdot f_2(k, V) \quad (9)$$

ve buradaki f_1 ve f_2 fonksiyonları ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$f_1(m_f, Q) = \left(m_f - \frac{Q_{MCC}}{LVC} \right) \cdot (w_{oxygen,available})^{c_{EGR}} \quad (10)$$

$$f_2(k, V) = C_{Rate} \cdot \frac{\sqrt{k}}{\sqrt[3]{V}} \quad (11)$$

Eş. 8-11 bakıldığında ise, Q_{MCC} karışım kontrollü yanma için kümülatif ısı salımını, C_{Comb} yanma sabitini, C_{Rate} karışım oran sabiti, k türbülanslı kinetik enerji yerel yoğunluğu, m_F buharlaşmış yakıt kütesini, LCV alt ısı değeri, V silindir hacmini, α krank açısını, $W_{Oxygen,available}$ mevcut oksijenin kütle oranını, C_{EGR} EGR etki sabitini temsil etmektedir.

Havanın döngü (swirl) ve sıkışma (squish) hareketlerinin kinetik enerji dağılımına etkileri daha küçük olduğu için sadece yakıt spreyinden gelen kinetik enerji girişi dikkate alınmaktadır. Bu sebepten silindirdeki dolguya aktarılan kinetik enerji miktarı doğrudan yakıt enjeksiyon miktarı ile belirlenir (Eş. 12'nin sağ tarafındaki ilk terim grubu). Dağılımın ise kinetik enerji ile orantılı olduğu düşünülür (Eş. 12'nin sağ tarafındaki ikinci terim grubu). Yeniden düzenlenmiş türbülanslı kinetik enerji değişimi hesabı için kullanılan eşitlik:

$$\frac{dE_{kin}}{dt} = 0.5 \cdot C_{turb} \cdot \dot{m}_F \cdot v_F^2 - C_{Diss} \cdot E_{kin}^{1.5} \quad (12)$$

$$k = \frac{E_{kin}}{m_{F,1}(1 + \lambda_{Diff} m_{stoich})} \quad (13)$$

Eş. 12 ve 13'te, E_{kin} kinetik jet enerjisini, C_{Turb} türbülanslı enerji üretim sabitini, C_{Diss} yayılım sabitini, $\dot{m}_{F,1}$ püskürtülen yakıt kütesini, v enjeksiyon hızını = $\frac{\dot{m}_F}{\rho_F \cdot \mu A}$, μA efektif nozul alanını, ρ_F yakıt yoğunluğunu, m_{stoich} taze hava dolgusunun stokiyometrik kütesini, λ_{Diff} difüzyon yanması için hava fazlalık katsayısını, t ise zamanı temsil etmektedir.

Tutuşma gecikmesi, aşağıdaki diferansiyel denklemin çözümü ile Andree ve Pachernegg [11] modeli kullanılarak Eş. 14 ile hesaplanır:

$$\frac{dI_{id}}{d\alpha} = \frac{T_{UB} - T_{ref}}{f_{id} \cdot Q_{ref}} \quad (14)$$

Tutuşma gecikmesi integrali tutuşma gecikmesi anında yani $I_{id} = 1.0$ (α_{id} açısında) değerine ulaştığında tutuşma gecikmesi τ_{id} aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\tau_{id} = \alpha_{id} - \alpha_{SOI} \quad (15)$$

Eş. 15'te, I_{id} tutuşma gecikmesi integralini, T_{ref} referans sıcaklığını (505 K), T_{UB} yanmamış bölge sıcaklığı, Q_{ref} referans aktivasyon enerjisini, f (damlacık çapı, oksijen içeriği, vb.), τ_{id} tutuşma gecikmesini, α_{SOI} püskürtme başlangıç zamanını krank açısı cinsinden, α_{id} tutuşma gecikme zamanını krank açısı cinsinden, f_{id} ise tutuşma gecikme kalibrasyon faktörünü ifade etmektedir.

2.4 Emisyon Oluşum Modeli (Emission Formation Model)

2.4.1 NO_x oluşum modeli (NO_x formation model)

AVL Boost programında kullanılan NO_x oluşum modeli Pattas ve Haefner'e [12] dayanmaktadır. İyi bilinen Zeldovich mekanizmasına dayanarak Çizelge 1'deki 6 reaksiyon dikkate alınır.

Tüm reaksiyon oranları r_i 'nin birimi [mole/cm³s], konsantrasyonların C_i 'nin birimi ise [mole/cm³]tür. N₂O konsantrasyonu Eş. 16'daki gibi hesaplanabilir:

$$c_{N_2O} = 1.1802 \cdot 10^{-6} \cdot T^{0.6125} \cdot e^{\left(\frac{9471.6}{T}\right)} \cdot c_{N_2} \cdot \sqrt{p_{O_2}} \quad (16)$$

ve

$$\alpha = \frac{c_{NO,act}}{c_{NO,eq}} \cdot \frac{1}{C_{KineticMult}}, \quad (17)$$

$$AK_2 = \frac{r_4}{r_2 + r_3}, \quad AK_4 = \frac{r_4}{r_5 + r_6}$$

2.4.2 CO oluşum modeli (CO formation model)

AVL Boost programında kullanılan CO oluşum modeli Onorati ve ark. [13] tarafından Çizelge 2'deki iki reaksiyon dikkate alınarak oluşturulmuştur:

CO üretim / yıkım oranı [mol/cm³.s] cinsinden denklem 18'deki gibi hesaplanmaktadır:

Çizelge 1. NO_x oluşum denklem ve katsayıları (NO_x formation equations and coefficients)

| | Stokiyometri | Oran $k_i = k_{0,i} \cdot T^a \cdot e^{\left(\frac{-T_{A_i}}{T}\right)}$ | k_0 [cm ³ , mol, s] | a [-] | T_A [K] |
|----|--|---|-------------------------------------|--------|-----------|
| R1 | N ₂ + O = NO + N | $r_1 = k_1 \cdot c_{N_2} \cdot c_O$ | 4.93E13 | 0.0472 | 38048.01 |
| R2 | O ₂ + N = NO + O | $r_2 = k_2 \cdot c_{O_2} \cdot c_N$ | 1.48E08 | 1.5 | 2859.01 |
| R3 | N + OH = NO + H | $r_3 = k_3 \cdot c_{OH} \cdot c_N$ | 4.22E13 | 0.0 | 0.0 |
| R4 | N ₂ O + O = NO + NO | $r_4 = k_4 \cdot c_{N_2O} \cdot c_O$ | 4.58E13 | 0.0 | 12130.6 |
| R5 | O ₂ + N ₂ = N ₂ O + O | $r_5 = k_5 \cdot c_{O_2} \cdot c_{N_2}$ | 2.25E10 | 0.825 | 50569.7 |
| R6 | OH + N ₂ = N ₂ O + H | $r_6 = k_6 \cdot c_{OH} \cdot c_{N_2}$ | 9.14E07 | 1.148 | 36190.66 |

Çizelge 2. CO oluşum denklem ve katsayıları (CO formation equations and coefficients)

| | Stokiyometri | Oran |
|----|---|---|
| R1 | CO + OH = CO ₂ + H | $r_1 = 6.76 \cdot 10^{10} \cdot e^{\left(\frac{-T}{1102.0}\right)} \cdot C_{CO} \cdot C_{OH}$ |
| R2 | CO + O ₂ = CO ₂ + O | $r_2 = 2.51 \cdot 10^{12} \cdot e^{\left(\frac{-24055.0}{T}\right)} \cdot C_{CO} \cdot C_{O_2}$ |

$$r_{CO} = C_{Const} \cdot (r_1 + r_2) \cdot (1 - \alpha) \quad (18)$$

ve

$$\alpha = \frac{C_{CO,act}}{C_{CO,equ}} \quad (19)$$

2.4.3 İS OLUŞUM MODELİ (Soot formation model)

AVL Boost programında kullanılan iki farklı is oluşum modeli bulunmaktadır. Schubiger ve ark. [14] tarafından oluşturulan model iki bölgeli yanma modellerinin is oluşumlarını hesaplamak için kullanılırken Çok-Bölgeli Yanma Modeli içinse Hiroyasu ve diğ.[15] tarafından geliştirilen model kullanılmaktadır.

Schubiger is oluşum modeli (Schubiger soot formation model)

Model, reaksiyon kinetik mekanizmaları tarafından yönetilen is oluşum mekanizması için iki reaksiyonu ele almaktadır. İS oluşum reaksiyonunda $\frac{dm_{s,f}}{dt}$ ifadesi difüzyon yanmada yanma oranını temsil etmektedir. Oksidasyon reaksiyonu, silindirdeki gerçek net is kütlesine ve yanmış bölgedeki oksijen mevcudiyetine bağlıdır. Karışım terimi τ_{char} küresel ısı salınım oranı ile ilgilidir.

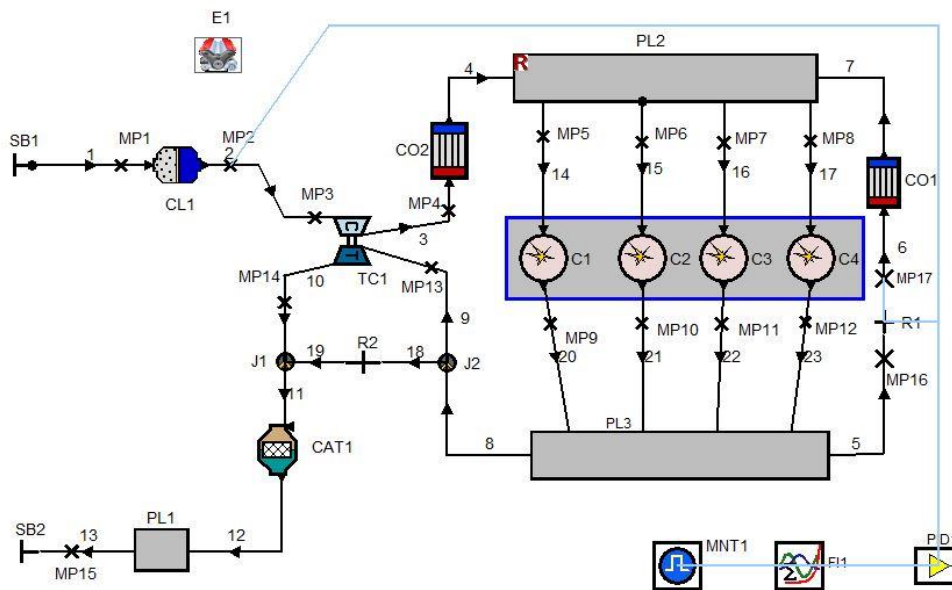
$$\frac{dm_{s,f}}{dt} = A_{s,f} \cdot \frac{dm_{fb,diff}}{dt} \cdot \left(\frac{p}{p_{ref}}\right)^{n_1} \cdot e^{\frac{E_{s,f}}{R_m \cdot T}} \quad (20)$$

$$\frac{dm_{s,o}}{dt} = A_{s,o} \cdot \frac{1}{\tau_{char}} \cdot (m_{soot})^{n_2} \cdot \left(\frac{p_{O_2}}{p_{O_2,ref}}\right)^{n_3} \cdot e^{\frac{E_{s,o}}{R_m \cdot T}} \quad (21)$$

Eş. 20 ve 21 bakıldığında; $\frac{dm_{s,f}}{dt}$ is oluşum oranını, $\frac{dm_{s,o}}{dt}$ is oksidasyon oranını, $\frac{dm_{fb,diff}}{dt}$ difüzyon yanmasının yanma oranı, p ve p_{ref} gerçek ve referans basınç değerlerini, $E_{s,f}$ ve $E_{s,o}$ oluşum ve oksidasyon aktivasyon enerjileri, p_{O_2} , $p_{O_2,ref}$ oksijenin gerçek ve referans kısmı basınçlarını, m_{soot} gerçek is kütlesini, $A_{s,f}$ is oluşum parametresini, $A_{s,o}$ is oksidasyon parametresini, τ_{char} karışım terimini, n_1 , n_2 , n_3 ise model sabitlerini temsil etmektedir.

3. AVL BOOST İLE MOTOR SİMULASYON MODELİ (ENGINE SIMULATION MODEL WITH AVL BOOST)

Bu çalışmada, analiz edilen dört silindirli dizel motor AVL Boost ticari yazılımı kullanılarak 1-B olmak üzere modellenmiştir. Modellenen motorun tüm bileşenlerinin ve bağlantılarının görülebileceği akım Şekil 2'de gösterilmiştir. Burada, her bir eleman arasında geçişi sağlayan bağlantı noktaları (1-23), emme ve egzoz manifoldlarını temsil eden plenumlar (PL1-PL3), istenilen sıcaklık, basınç, emsiyon vb. değerlerin alınması için ölçüm noktaları (MP1-MP15), kompresörden ve egzoz manifoldundan çıkan sıcak gazın soğutulması için arasoğutucular (CO1-CO2), motora giren havanın temizlenmesi için hava filtresi (CL1), egzoz gazının atık ısısından yararlanarak silindir içerisine fazla hava basılmasını sağlayan turboşarj (TC1), silindirler (C1-C4), sistem sınır şart tanımlamaları (SB1-SB2), EGR kontrolü için PID devresi (PID-1), EGR oranı



Şekil 2. Modellenen dört silindirli dizel motorun AVL Boost görüntüsü (AVL Boost image of the four-cylinder diesel engine modeled)

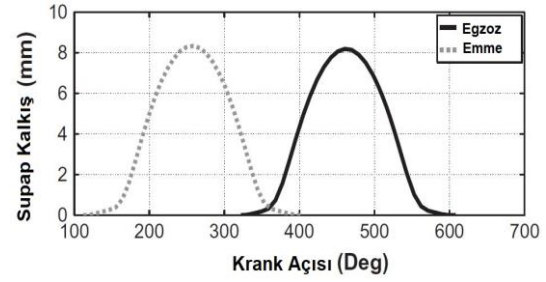
formülasyonu için (F11), çıktı alabilmek için (MNT1), waste gate bağlantı noktaları (J1-J2), egzoz gazının ne kadarının emme manifolduna ne kadarının direkt egzoz hattından dışarıya atılacağını belirleyen sınırlayıcılar (R1-R2) ve katalitik konvertör (CAT1) bulunmaktadır. Modelde “general species” seçimi yapılarak farklı yakıt tanımlamalarına imkan tanınırken, bu tanımlamalara bağlı emisyon değerlerinin alınması sağlanmıştır. Borulardan ve manifoldlardan geçen akış başlangıç verisi olarak tanımlanması gereken akış katsayıları ile tek boyutlu olarak simule edilmektedir. Akış süreklilik, momentum ve enerji korunum denklemleri ile tanımlanırken; sürtünme katsayısı ve duvarlara ısı transferi borular boyunca değişkenlik göstermektedir [7].

Çizelge 3. Motor Özellikleri (Engine Specifications) [16,17]

| Özellik | Değer |
|-----------------------------------|-----------|
| Silindir Hacmi (cm ³) | 1497 |
| Silindir Sayısı (adet) | 4 |
| Silindir Çapı / Kurs (mm) | 76 / 82.5 |
| Biyel Kolu (mm) | 134.25 |
| Sıkıştırma Oranı (-) | 16.5:1 |

Silindir bloğu programın en çok alt model içeren ve en çok bilgi girilmesi gereken bölümüdür. Burada motor konstrüksiyon bilgileri, egzoz valfi açık konumda iken sıcaklık ve basınç değerleri, yanma modeli, yakıt miktarı, enjeksiyon bilgileri, emisyon kalibrasyon faktörleri, ısı transferi modeli, ısı transferi gerçekleşecek yüzey alan bilgilerinin yanı sıra emme ve egzoz valf bilgilerinin doğru bir şekilde programa tanıtılması gerekmektedir. Modelde kullanılan motor özellikleri Çizelge 3’de verilmiştir. Yanma modeli için parçalı enjeksiyonun modellenmesine olanak tanıyan MCC modeli, ısı transferinde ise Woschni 1978 ısı transferi modeli

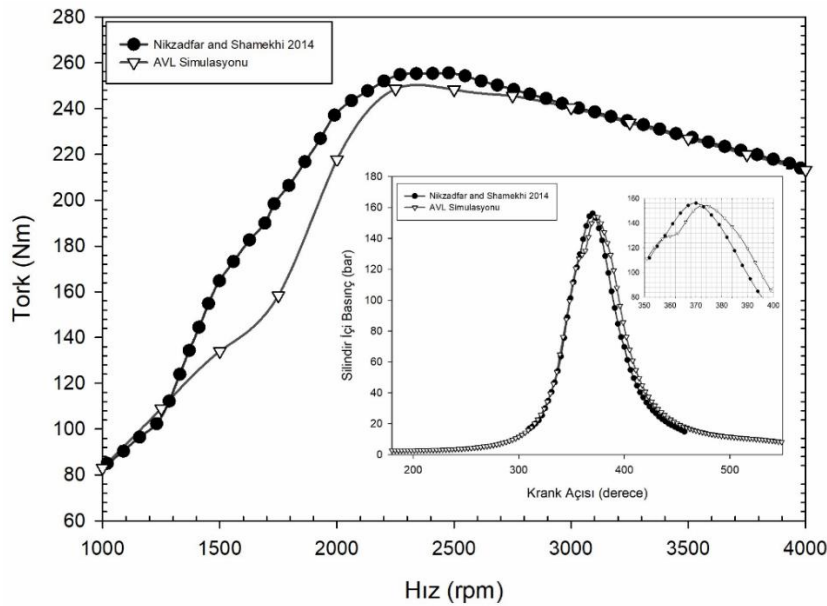
kullanılmıştır. Ayrıca modelde kullanılan emme ve egzoz supaplarının krank açısına bağlı kalkış yüksekliği Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Emme ve egzoz supabı kalkış eğrileri (Intake and exhaust valve lift curve) [16,17]

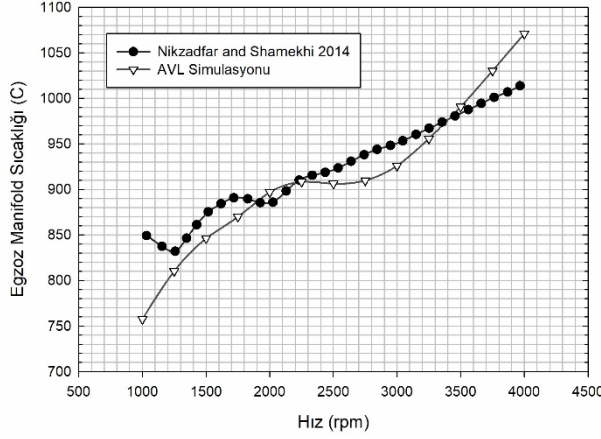
4. SAYISAL MODELİN DENEYSEL VERİLERLE DOĞRULANMASI (NUMERICAL MODEL VALIDATION WITH EXPERIMENTAL RESULTS)

Literatürden [16,17] alınan deneysel verilerle tam yük altında 2500 devir/dak’da silindir içi basınç, farklı hızlarda tork, emisyon ve yakıt tüketim değerleri AVL Boost programı ile simule edilerek kullanılan programın doğruluğu sağlanmıştır. Şekil 4’e bakıldığında tork grafiğinde deneysel verilerle sayısal simülasyonlar arasındaki farkın 1750 devir/dak’da maksimum %20 olduğu görülürken, 2500 devir/dak’da alınan silindir içi basınç değeri için hata oranı yaklaşık olarak %6 olarak görülmektedir. Tork değerindeki 1500 – 2200 devir/dak’daki veriler arasındaki fark deneysel çalışma içeriğinde sürtünme kuvveti bilgisi ölçülerek sunulmadığı için benzer motor spesifikasyonları değerlendirilerek yağ seçimleri yapılmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca deneysel çalışma içeriğinde bir belirsizlik analizi yapılmadığı görülmektedir. Tüm bu parametreler birlikte değerlendirildiğinde hata



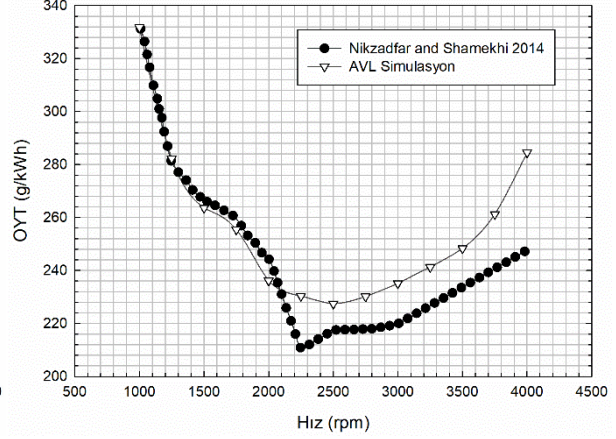
Şekil 4. Tork ve 2500 devir/dak’da silindir içi basınç değerleri doğrulama grafiği (Torque and cylinder pressure values verification graph at 2500 rpm)

oranlarının kabul edilebilir bir seviyede olduğu anlaşılmaktadır. Sayısal modelleme ile elde edilen egzoz manifoldu çıkışı sıcaklığı ve özgül yakıt tüketimi değerleri deneysel verilerle Şekil 5’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5. Egzoz manifold sıcaklığı ve özgül yakıt tüketimi doğrulama grafikleri (Exhaust manifold temperature and specific fuel consumption validation graphs)

verilere en yakın sonuçları verebilmesi için yapılan parametrik çalışmadır.

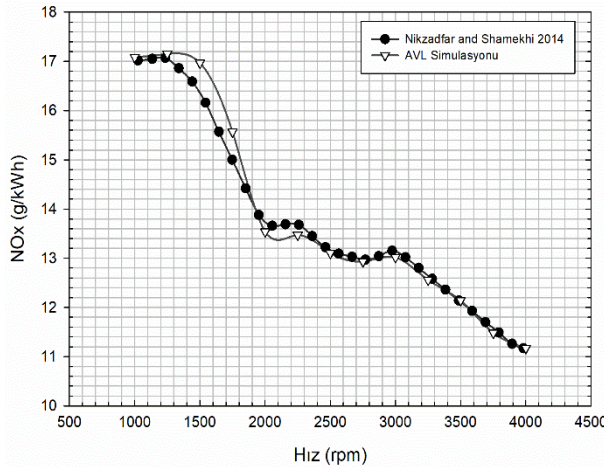


Şekil 5’e bakıldığında egzoz manifold sıcaklıkları arasındaki farkın maksimum %11 civarında olduğu görülmektedir. Ancak bu değer silindir içi kararsızlıkların en fazla yaşandığı rölanti devrine yakın bir devirde olduğu, deneysel belirsizliklerin bulunduğu ve programın bir-boyutlu olması göz önüne alınırsa kabul edilebilir bir değer olduğu söylenebilir. Benzer şekilde bu değer ÖYT için yaklaşık %12 mertebesindedir. Burada da maksimum gücün alındığı değer olan 4000 devir/dak’da bu fark görülmektedir. Sayısal modelleme ile elde edilen NO_x emisyonu ve is oluşum değerleri deneysel verilerle Şekil 6’da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

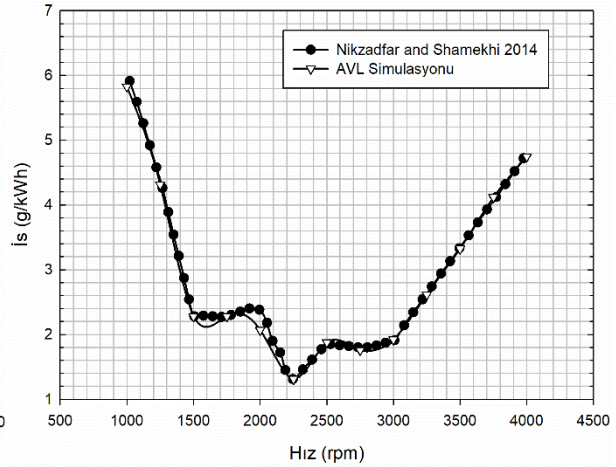
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

5.1 Motor Performans Sonuçları (Engine Performance Results)

1000 – 4000 devir/dak arasındaki dizel yakıt ile birlikte farklı karışım oranlarındaki (%5, %10 ve %15) etanol ve metanol katkısının motor torkuna, gücüne, yakıt tüketimine ve egzoz manifoldu sıcaklık değerlerine olan etkileri Şekil 7-10 arasında verilmiştir (Burada DM ve DE metanol ve etanol katkısını belirtirken yanındaki sayılar katkı oranlarını belirtmektedir).

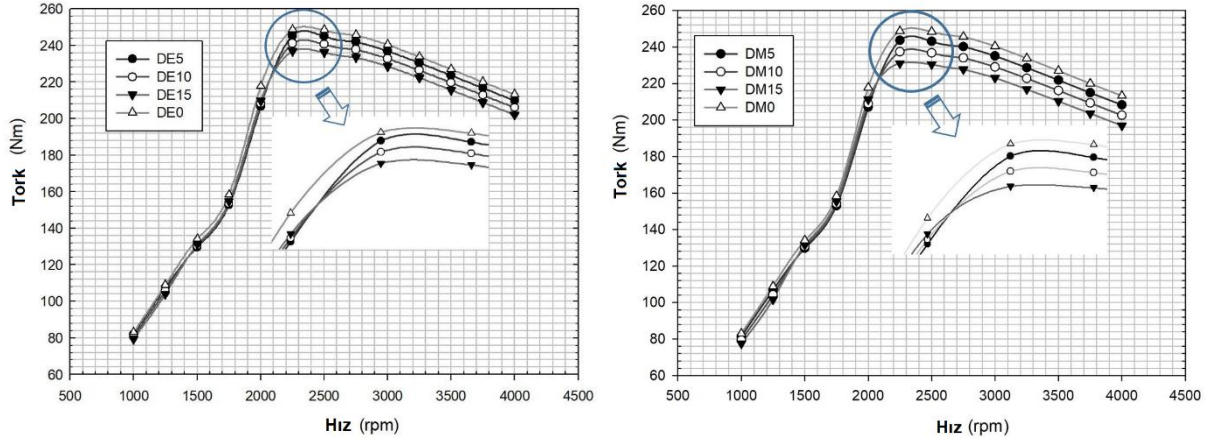


Şekil 6. NO_x ve is emisyon değerleri doğrulama grafikleri (NO_x and is emission values validation graphs)

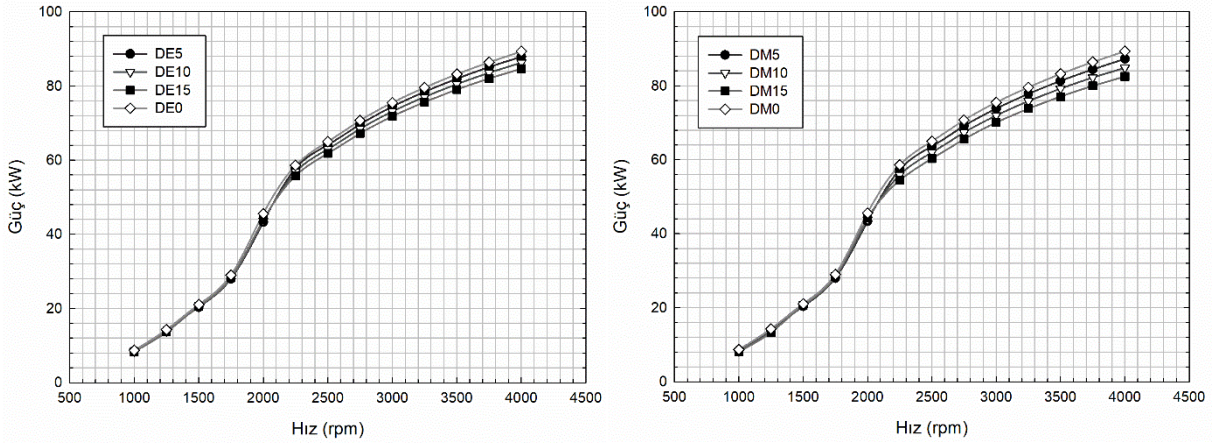


Şekil 6’da ise, emisyon değerleri için yapılan simülasyon ile deneysel verilerin uyum içinde olduğu görülmektedir. Gerek deneysel sonuçlar gerekse model sonuçları bakımından artan devir sayısı ile NO_x ve is davranışları beklenen eğilimlerdedir. Bunun sebebi ise programın emisyon değerleri için kalibrasyon faktörü ile deneysel

Şekil 7 ve 8’e bakıldığında düşük devirlerde yakıt katkısının motor torku ve gücüne olumsuz bir etkisi görülmezken, artan devir sayısı ve yakıt katkı oranının motor torkunu, buna bağlı olarak da motor gücünü düşürdüğü görülmektedir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında %5, %10 ve %15 etanol katkısının saf dizel



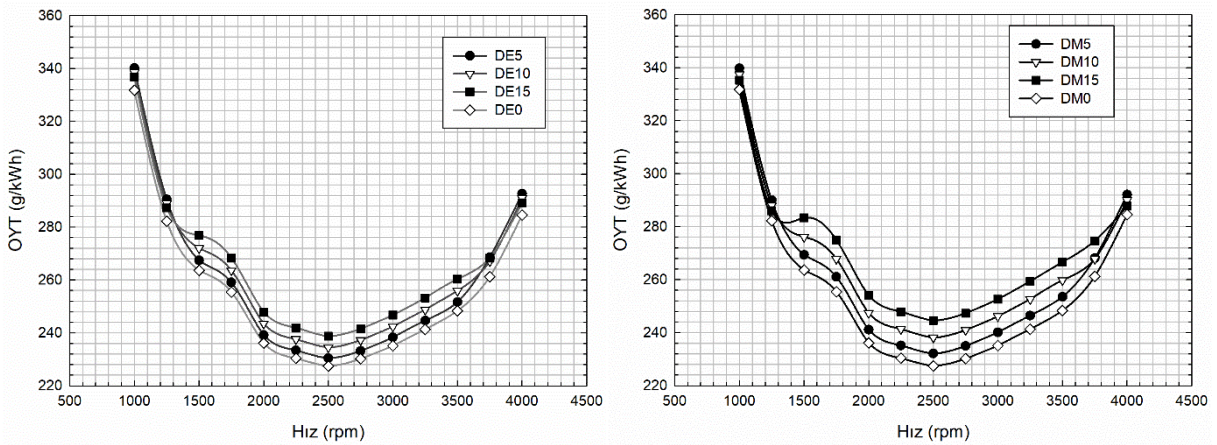
Şekil 7. Etanol ve metanol karışımları için motor tork grafikleri (Engine torque graphs for ethanol and methanol mixtures)



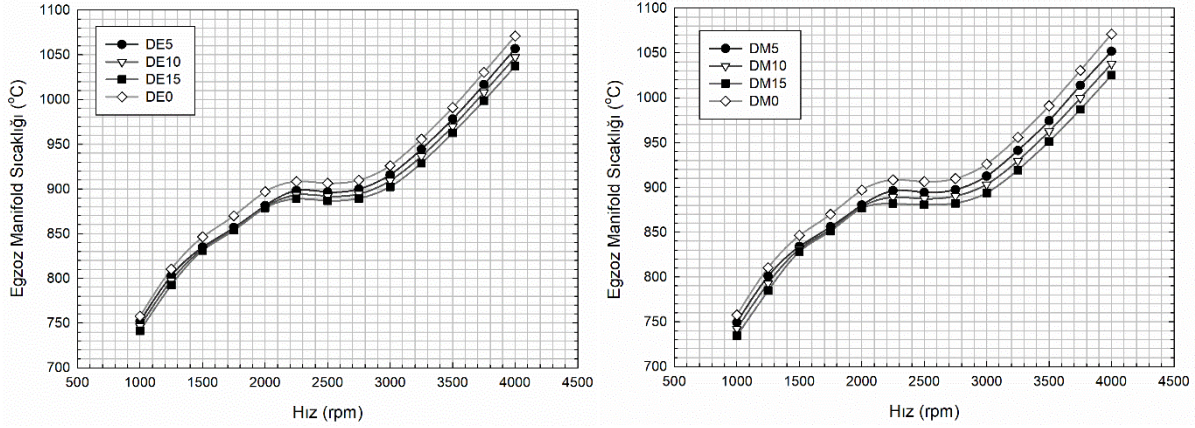
Şekil 8. Etanol ve metanol karışımları için motor güç grafikleri (Engine power graphs for mixtures of ethanol and methanol)

yakıt kullanımına göre güçteki düşüş oranları maksimum %5, %4 ve %5 iken metanol kullanımında ise bu oranlar %5, %5 ve %8 oranında olmaktadır. Ayrıca etanol ve metanol katkılı grafikler beraber değerlendirildiğinde %5, %10 ve %15 etanol katkısının aynı oranda metanol katkısına göre %1, %2 ve %3 daha fazla tork ve güç verdiği görülmektedir. Etanol ve metanolün sahip olduğu yüksek oksijen içeriği ile birlikte daha iyi bir yanma sağlanması beklenirken, etanol ve metanolün alt ısı değerlerinin dizel yakıtına göre daha düşük olması ve artan

sürtünme kuvvetlerinin baskın olması tork ve güçte yaşanan kayıpları açıklar niteliktedir. Genel olarak yakıt tüketimi değerleri yük ve hız gibi motor çalışma rejimine bağlıdır. Şekil 9’da maksimum tork değerinin elde edildiği hız değerlerinde bütün yakıt çeşitleri için yakıt tüketimlerinin en az olduğu görülmektedir. Ayrıca etanol ve metanolün sahip olduğu düşük alt ısı değerlerinden dolayı ve aynı gücü elde edebilmek için silindir içerisine daha fazla yakıt gönderme gereksiniminden kaynaklanan daha fazla yakıt tüketimi görülmektedir.



Şekil 9. Etanol ve metanol karışımları için motor ÖYT grafikleri (Engine SFC graphics for mixtures of ethanol and methanol)



Şekil 10. Etanol ve metanol karışımları için egzoz manifold sıcaklıkları grafikleri (Exhaust manifold temperatures for ethanol and methanol mixtures)

Şekil 10'a bakıldığında ise artan devir ile birlikte egzoz manifold sıcaklığının da arttığı görülmektedir. En yüksek sıcaklık değeri saf dizel kullanımında görülürken katkı oranında artışın manifold sıcaklığını düşürdüğü görülmektedir.

Bunun sebebi etanol ve metanolün sahip olduğu buharlaşma ısısının yüksek olması ve ek olarak alev sıcaklığının düşük olması gösterilebilir. Etanol ve metanol katkısının manifold sıcaklığına olan etkisine bakılacak olursa etanolün daha yüksek buharlaşma ısısına sahip olmasından dolayı manifold sıcaklıkları metanole göre daha yüksektir. Benzer durumlar Canakci vd. (2008) tarafından da belirtilmiştir [18].

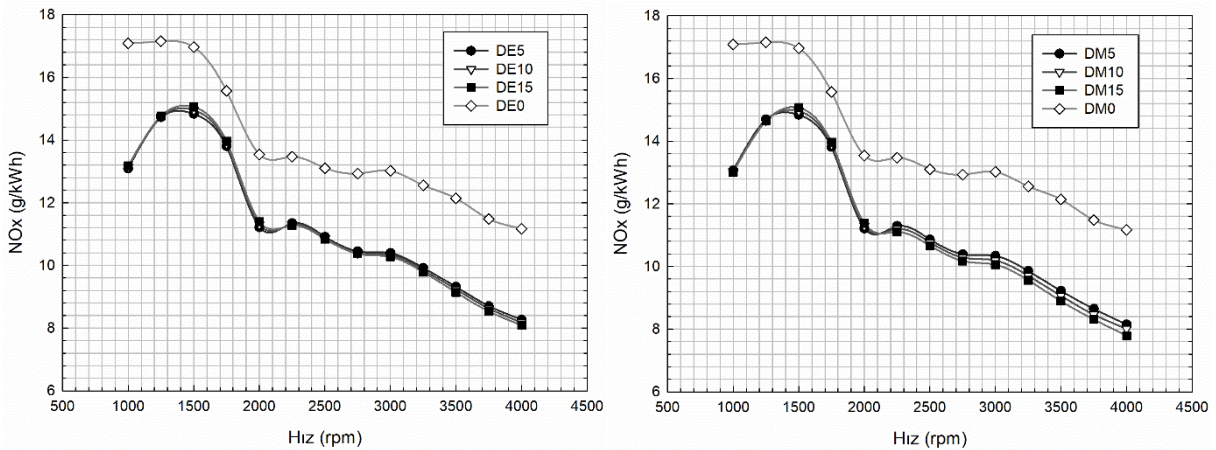
5.2 Motor Emisyon Sonuçları (Engine Emission Results)

Şekil 11'de, NO_x değerlerine bakıldığında saf dizel ve karışım halleri için devir arttıkça NO_x miktarının azaldığı görülmektedir. Ayrıca artan etanol ve metanol miktarı ile birlikte de NO_x emisyonunda azalma olduğu görülmektedir. NO_x oluşum temelde iki parametreye bağlıdır. Bunlar silindir içi sıcaklık ve yakıtta bulunan oksijen miktarıdır.

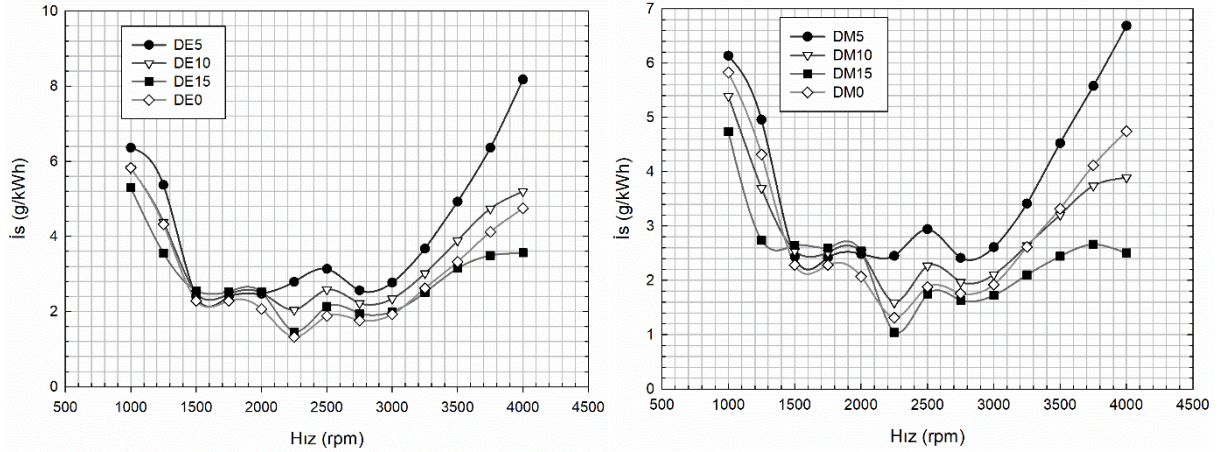
Etanol ve metanolün oksijen içeriği fazla olmasına rağmen silindir içi sıcaklık değerinin düşük olması bu etkiyi baskılayarak NO_x emisyon değerinin azalmasını sağlamıştır. Datta ve Mandal'ın (2016) yaptıkları çalışmada benzer durumlar görülmektedir [19].

Dizel motorlarda karşılaşılan en önemli emisyon sorunlarından biri de is(kurum) oluşumudur. Bunun sebeplerinden biri yakıtın emme manifoldundan ön karışım olarak gelmemesi, sıkıştırılan havanın üzerine direkt püskürtülerek homojen bir karışım oluşması için yeterli zamanın kalmaması gösterilebilir.

Bir diğer sebep olarak karbon ve hidrojen atomlarının oksitlenme için gerekli oksijen miktarı ile birlikte sıcaklık şartlarının sağlanamamasıdır. Şekil 12'e bakıldığında genel olarak etanol ve metanol katkısının dizel yakıttan daha fazla is oluşumuna sebep verdiği gözlenirken artan katkı miktarı ile is oluşumunun azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak yakıt içi artan oksijen miktarının karbon atomlarının kolayca oksitlenmesini sağlaması gösterilebilir.



Şekil 11. Etanol ve metanol karışımları için NO_x emisyon grafikleri (NO_x emission graphs for ethanol and methanol mixtures)



Şekil 12. Etanol ve metanol karışımları için is emisyonu grafikleri (Soot emission graphs for ethanol and methanol mixtures)

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan çalışmada saf dizel yakıt ile birlikte farklı oranlarda etanol ve metanol katkısının motor performans ve emisyon değerlerine olan etkileri incelenmiştir. AVL Boost yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen 1-B modelleme çalışmasının deneysel verilerle uyum içinde olan sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu sonuç; motor karakteristiğinin ve akım şemasının eksiksiz tasarlandığı 1-B modelleme ile motor performans ve emisyon eğrilerinin elde edilebileceğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ise;

i) Etanol ve metanol katkı miktarının artması ile birlikte sahip oldukları düşük alt ısıl değerlerinden dolayı tork ve güç değerlerinde azalma olduğu görülürken yakıt tüketiminde ise artış olduğu görülmüştür.

ii) Etanol ve metanolün sahip oldukları yüksek buharlaşma ısısından dolayı da egzoz manifold çıkış sıcaklıklarında düşüş olduğu görülmüştür.

iii) Emisyon değerlerine bakıldığında ise silindir içerisindeki sıcaklık düşüşü oksijen içeriğine baskın hale gelerek NO_x değerlerinin azalmasını sağlamıştır.

iv) İS değerinde ise artan katkı miktarının is oluşumuna olumlu bir etki yaptığı görülmektedir.

Genel olarak performans ve emisyon değerleri ortak incelendiğinde etanolün %5, %10 ve %15 katkı oranlarında kullanılması önerilebilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Üniversite Ortaklığı Programı kapsamında AVL Boost yazılımı sağladığı için AVL LIST GmbH'ya teşekkürlerimizi sunarız. (We would like to thank AVL LIST GmbH for providing AVL Boost software under the University Partnership Program.)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Wojs M.K., Orlinski P., Sar H., "Combustion Process in Bi-Fuel Enginepowered by Propane and Diesel Engine", *Proceedings of the institute of vehicles*, 2:37–48, (2015)
- [2] Kaewpradap A, Pongsirisuntorn P, Nuntapap N, Laoonual Y., "Study of Agricultural Engine for Predicting Engine Performance by Thermodynamics Model" *The 4th TSME International Conference on Mechanical Engineering*, Thailand, (2013)
- [3] Thi T, Huong T, Khanh ND, Luong PH, Tuan LA., "A Computational Study of the Effects of Injection Strategies on Performance and Emissions of a Syngas / Diesel Dual-Fuel Engine", *The 5th AUN/SEED-Net Regional Conference on Global Environment, Bandung, Indonesia*, 379–392, (2012)
- [4] Aldhaidhawi, M., Chiriac, R., Bădescu, V., Descombes, G., Podevin, P., "Investigation on the mixture formation, combustion characteristics and performance of a Diesel engine fueled with Diesel, Biodiesel B20 and hydrogen addition", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(26): 16793–16807, (2017)
- [5] Praptijanto, A., Muharam, A., Nur, A., Putrasari, Y., "Effect of ethanol percentage for diesel engine performance using virtual engine simulation tool", *Energy Procedia*, 68: 345–354. (2015)
- [6] AVL BOOST Theory Guide version 2018, AVL LIST GmbH, Graz, Austria.
- [7] AVL BOOST User Guide version 2018, AVL LIST GmbH, Graz, Austria.
- [8] Woschni, G., "A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in Internal Combustion Engines", *SAE 6700931*.
- [9] Chmela, F. and Orthaber, G., "Rate of Heat Release Prediction for Direct Injection Diesel Engines Based on Purely Mixing Controlled Combustion", *SAE Paper 01 0186*, (1999)
- [10] Chmela, F., Orthaber, G. and Schuster, W., "Die Vorausberechnung des Bannverlaufs von Dieselmotoren mit direkter Einspritzung auf der Basis des Einspritzverlaufs", *MTZ* 59, (1998) 7/8
- [11] Andree, A. and Pachernegg, S. J., "Ignition Conditions in Diesel Engines", *SAE 690253*

- [12] Pattas K., Harfner G., "Stickoxidbildung bei der ottomotorischen Verbrennung", *MTZ* Nr. 12: 397-404, (1973).
- [13] Onorati A., Ferrari G., D'Errico, G., "1D Unsteady Flows with Chemical Reactions in the Exhaust Duct-System of S.I. Engines: Predictions and Experiments", *SAE Paper* No. 2001-01-0939.
- [14] Schubiger R.A., Boulouchos K., Eberle M.K., "Russbildung und Oxidation bei der dieselmotorischen Verbrennung", *MTZ* 5/2002: 342-353, (2002).
- [15] Hiroyasu, H., Kadota, T., Arai M., "Development and Use of a Spray Combustion Modeling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emissions, Part I": *Combustion Modeling, Bulletin of the JSME*, 26: 569-575, (1983).
- [16] Nikzadfar K, Shamekhi AH., "Investigating the relative contribution of operational parameters on performance and emissions of a common-rail diesel engine using neural network", *Fuel*, 125: 116–128, (2014)
- [17] Nikzadfar K, Shamekhi AH., "An extended mean value model (EMVM) for control-oriented modeling of diesel engines transient performance and emissions", *Fuel*, 154: 275–292, (2015)
- [18] Canakci M, Sayin C, Gumus M., "Exhaust Emissions and Combustion Characteristics of a Direct Injection (DI) Diesel Engine Fueled with Methanol - Diesel Fuel", *Energy & Fuels*, 22(6): 3709–3723, (2008)
- [19] Datta A, Mandal BK., "Impact of alcohol addition to diesel on the performance combustion and emissions of a compression ignition engine", *Appl Therm Eng*, 98: 670–82 (2016).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Dikdörtgen parçalar ile iki boyutlu kesme ve paketleme problemi için sezgisel yöntemler kullanan bir hibrit metodoloji

A hybrid methodology using heuristic methods for two-dimensional cutting and packing problem with rectangular pieces

Yazar(lar) (Author(s)): Hüseyin FIRAT¹, Nuh ALPASLAN², Davut HANBAY³

ORCID¹: 0000-0002-1257-8518

ORCID²: 0000-0002-6828-755X

ORCID³: 0000-0003-2271-7865

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Fırat H., Alpaslan N. ve Hanbay D., “Dikdörtgen parçalar ile iki boyutlu kesme ve paketleme problemi için sezgisel yöntemler kullanan bir hibrit metodoloji”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 979-988, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.487602

Dikdörtgen Parçalar ile İki Boyutlu Kesme ve Paketleme Problemi için Sezgisel Yöntemler Kullanan Bir Hibrit Metodoloji

Araştırma Makalesi / Research Article

Hüseyin FIRAT¹, Nuh ALPASLAN^{2*}, Davut HANBAY¹

¹Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Müh. Bölümü, İnönü Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Müh. Bölümü, Bingöl Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 26.11.2018 ; Kabul/Accepted : 21.01.2019)

ÖZ

Kesme ve paketleme problemi, endüstrilerde farklı amaçlar için kullanılan malzemelerden belirli büyüklük ve oranlarda küçük parçaların kesilmesi işlemidir. Bu problem, matematiksel modellerle ifade edilemediğinden dolayı, çözüm için çok boyutlu uzayda kombinasyonel optimizasyon kullanılır. Bu problemin amacı, yerleştirme işlemi için kullanılan malzemenin kullanılabilirliğini arttırmak ve fire oranını minimize etmektir. Bu çalışmada, iki boyutlu düzenli kesme ve paketleme problemine, geliştirilmiş alt-sol, alt-sol dolgu yerleşim algoritmaları, uygun olmayan çokgen ve ilk uygun azalan sezgisel algoritmalarından oluşan birleştirilmiş bir yöntem ile çözüm sunulmuştur. Parçaların belirli bir permütasyon sırasına göre alt-sol kısımdan başlayarak yerleşimi için geliştirilmiş alt-sol yerleşim algoritması, yerleşim modelinde mevcut boş alanlara uygun parçaların yerleştirilmesi için alt-sol dolgu algoritması, parçalar arasında geometrik çakışmayı önlemek için uygun olmayan çokgen yöntemi ve parçalar alanlarına göre büyükten küçüğe doğru sıralandıktan sonra seçim algoritması olarak da ilk uygun azalan sezgisel algoritması kullanılmaktadır. 11 farklı test verisi için yerleştirme işlemi gerçekleştirilmiş ve performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Birleştirilmiş sezgisel yöntemlerle gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda P2 ve P10 yerleşim modellerinde firesiz bir yerleşim olduğu görülmektedir. Bu da optimal çözümün elde edildiğini göstermektedir. Diğer yerleşim modellerinde ise, % 4.54 ile % 16.7 aralığında fire oranı elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar, kesme ve paketleme probleminin çözümü için önerilen sezgisel yöntemlerin etkinliğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kesme ve paketleme problemi, uygun olmayan çokgenler, geliştirilmiş alt-sol ve alt-sol dolgu yerleşim teoremi, ilk uygun azalan sezgisel algoritması.

A Hybrid Methodology Using Heuristic Methods for Two-Dimensional Cutting and Packing Problem with Rectangular Pieces

ABSTRACT

The cutting and packing problem is the process of cutting small pieces of certain sizes and proportions from materials used for different purposes in industries. Because this problem cannot be expressed by mathematical models, combinatorial optimization in multidimensional space is utilized for the solution. The aim of this problem is to increase the usability of the material used for the placement process and to minimize the trim loss. In this study, a solution is presented to two-dimensional regular cutting and packing problem by a combined method consisting of improved bottom-left, bottom-left fill placement algorithms, no-fit polygon and first fit decreasing heuristic algorithms. The improved bottom-left placement algorithm for the placement of parts starting from the bottom-left part according to a certain permutation order, bottom-left fill algorithm for the placement of suitable pieces to the available free spaces in placement model, no-fit polygon method for preventing the geometric overlap between the parts and the first fit decreasing heuristic algorithm is used as the selection algorithm after ordering from large to small according to the parts areas. Placement process and performance evaluation was performed for 11 different test data. As a result of the studies carried out with combined heuristic methods, it is seen that there is a placement without any waste in P2 and P10 placement models. This shows that the optimal solution is obtained. In other placement models, a trim loss was obtained between 4.54% and 16.7%. The experimental results show the effectiveness of the proposed heuristic methods for the solution of the cutting and packing problem.

Keywords: Cutting and packing problem, no-fit polygons, improved bottom-left and bottom-left fill placement theorem, first-fit decreasing heuristic algorithm.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : nalpaslan@bingol.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kesme ve paketleme problemi, günlük hayatta pek çok farklı şekilde ortaya çıkmaktadır. Bir insanın, bir bavul veya dolabın içine elbiselerini yerleştirilmesi veya bir dondurucuda gıda maddelerinin yerleştirilmesi vb. gibi paketleme problemleri örnek olarak verilebilir. İnsanlar, kesme ve paketleme problemini sezgisel ve mekânsal farkındalık kullanarak belli bir dereceye kadar çözebilmektedir. Ancak, benzer pek çok kesme ve paketleme probleminin olduğu endüstriyel ortamlarda, bu problemi manuel yolla çözmek genel itibariyle mümkün değildir ve daha çok insan gücü gerektirdiği için maliyet açısından da uygun bir durum değildir. Kesme ve paketleme probleminin bilgisayar destekli otomasyonu ise, bu probleme oldukça iyi bir çözüm sunmaktadır. Bu çözüm akademik ve endüstriyel tabanlı çalışmalar yapan topluluklar için oldukça iyi bir araştırma konusu olmuştur. Bilgisayarlarda sezgisel veya mekânsal farkındalık olmadığından dolayı düzenler oluşturulurken, algoritmaya dayalı yöntemler geliştirilmiştir. Endüstriyel tabanlı çalışmalarda problemler genel itibariyle karmaşık olduğundan dolayı daha fazla modelleme gerektirmektedir.

Kesme ve paketleme problemi, birleştirici optimizasyon problemidir [1]. Bu problemin genel tanımı "büyük bir malzemeden belirli oranlarda ve belirli büyüklüklerde küçük parçaların kesilmesidir. İmalat endüstrilerinin çoğunda hammaddelerin küçük parçalara kesilmesi gerekmektedir. Kesme işlemi genel itibariyle atıkla sonuçlanmaktadır. Bundan dolayı, fazla olan atık miktarını olabildiğince azaltmak ve elde bulunan malzemenin kullanımını maksimum yapmak istenmektedir. Bu problemin örnekleri, sac metal, kâğıt, giyim, cam, plastik, deri, otomotiv vb. gibi pek çok endüstride görülmektedir [2]. Kesme ve paketleme problemi ile ilgili 1940'lı yıllardan bu yana çeşitli çalışmalar olmasına rağmen, daha çok 1960'lı yılların başlarında araştırma alanı olmuştur. Geçtiğimiz yarım yüzyılda, pek çok endüstri için daha iyi kesim kalıpları üretmek adına birçok teknik geliştirilmiştir. Kesme ve paketleme endüstrisinde ve akademik literatürde var olan çok sayıda problem, aynı türden bir probleme gönderme yapmasından dolayı, kesme ve paketleme problemindeki esas yapıyı araştırmak ve akademik toplulukta araştırmaların verimliliğini arttırmak için problemleri sınıflandırmak oldukça önemliydi. Bu doğrultuda, 1990 yılında Dyckhoff, problem tiplerini tanımlayabilmek için dört farklı özellikten oluşan bir sınıflandırma topolojisi önermiştir [3].

Birinci özellik, problem boyutunun tanımlanmasıdır. Bir, iki, üç ve N boyutlu problemler olabilir. Genel itibariyle problemler 1/2/3 boyutludur ve N-Boyutlu kesme ve paketleme problemi dışında açıklayıcıdır. N boyutlu bir problem için kamyon yüklemesi örneği düşünülebilir. Bu örnek üç mekânsal boyut içermektedir, ancak ağırlık da önemli bir faktör olduğunda başka bir mekânsal olmayan boyut eklenmektedir. Bu durumda, uzunluk, yükseklik, genişlik ve ağırlık olmak üzere boyut sayısı dört olmaktadır. N boyuttaki problemlere, veri depolama

için bilgisayar belleğinin dinamik dağılımı ve sermaye bütçeleme problemi de örnek olarak verilebilir.

İkinci özellik, görev türüdür. Burada iki önemli durum vardır: i) yerleştirme yapılacak kaynak üzerine tüm parçalar yerleştirilir, ii) yerleştirme yapılacak kaynak sınırlıdır ve tüm parçalar yerleştirilemez. Birinci durumda, kaynak üzerine yerleştirilecek olan parçaların iyi bir şekilde düzenlenmesi üzerinde durulurken, ikinci durumda ise amaç, bazı nesnel işlevleri en aza indirmek için sınırlı sayıdaki kaynaklara olabildiğince çok parça yerleştirmektir.

Üçüncü özellik, yerleştirme işleminin yapılacağı kaynakların (kullanılacak olan malzemenin veya nesnelere) çeşitliliğini içermektedir (iki boyutlu paketlemede kullanılan malzemeler). Burada oluşabilecek durumlar şunlardır: i) tek bir kaynak, ii) birden fazla aynı kaynak ve iii) birden fazla farklı kaynak. İlk durumdaki farklılık, yerleştirme yapılacak kaynaklar arasında herhangi bir etkileşim olmamasıdır. Birden fazla aynı kaynağın kullanıldığı ikinci durumda, mevcut kaynak üzerinde yerleştirme işlemi tamamlandıysa, yeni bir kaynak üzerinde yerleştirme işleminin başlatılması gerekmektedir. Son durum olan farklı kaynakların kullanıldığı durumda ise, üretilen çözümlerin kalitesi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir ve bir kez daha, bir kaynağın yerleştirme işleminin tamamlanması halinde yeni bir kaynağın yerleştirme işleminin ne zaman başlayacağı tanımlanmalıdır.

Dördüncü özellik ise, yerleştirme işlemi için kullanılacak olan küçük parçaların çeşitliliği ile ilgilidir (iki boyutlu paketlemedeki şekiller). Dört farklı durum vardır: i) aynı parçalar/şekiller, ii) az sayıda ve farklı parçalar, iii) çok sayıda aynı parça ancak birkaç farklı parça ve iv) birçok aynı ve birçok farklı parça. Bu parçaların/şekillerin yerleştirilme işlemleri problemde probleme değişkenlik göstermektedir. Bu dört özellik, kesme ve paketleme problemi için bir sınıflandırma oluşturacak şekilde birleştirilebilmektedir.

Kesme ve paketleme probleminin iş ve endüstrideki uygulamaları çok geniş olduğundan, son yıllarda birçok araştırmacı bu problemi çözmek için çeşitli yöntemler geliştirmiştir. Bu problem ile ilgili literatürde uygulanabilir sezgisel (uygun olmayan çokgen, alt-sol, alt-sol dolgu ve geliştirilmiş alt-sol vb.) ve metasezgisel (genetik algoritma, benzetimli tavlama, tabu arama vb.) yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler ile kesme ve paketleme probleminin çözümü için malzeme kullanımdan elde edilecek olan verimi arttırmak ve optimal çözümler üretmek amaçlanmaktadır. Bu problemin çözümü için sadece metasezgisel veya sezgisel yöntemler kullanmak yerine, bu yöntemlerin birleştirilme durumu çoğu araştırmacı tarafından araştırılmış ve son yıllarda metasezgisel yöntemler ile alt-sol, geliştirilmiş alt-sol veya alt-sol dolgu sezgisel yöntemleri kullanılarak geliştirilen yerleşim düzenlerinde elde edilen verimlilik değerlerinin başarılı olduğu gözlemlenmiştir. [4] nolu çalışmada, metasezgisel yöntemlerden genetik algoritma (GA) ve

sezgisel yöntemlerden ise geliştirilmiş alt-sol ile alt-sol dolgu yöntemleri kullanılarak uygulamalar gerçekleştirilmiştir. 16, 17, 25 ve 29 dikdörtgen parçanın yerleştirme işlemi gerçekleştirildiğinde sırasıyla %91, %87, %79 ve %88 oranında bir verimlilik değeri elde edilmiştir. [5] nolu çalışmada metasezgisel yöntemlerden genetik algoritma ve sezgisel yöntemlerden geliştirilmiş alt-sol yerleşim algoritması kullanılarak uygulamalar gerçekleştirilmiştir. 10, 28, 40, 50 ve 97 dikdörtgen parçanın yerleştirme işlemi gerçekleştirildiğinde sırasıyla %100, %93.75, %96.38, %93.75 ve %96 oranında bir verimlilik değeri elde edilmiştir.

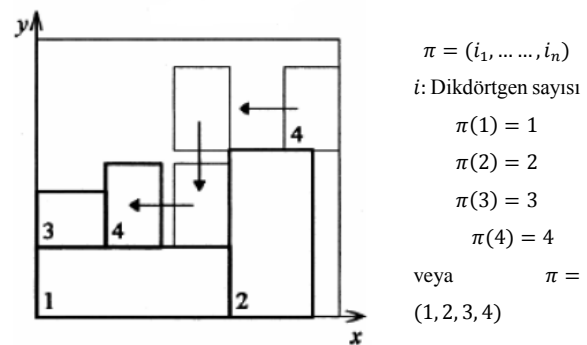
Bu çalışmada ise, herhangi bir metasezgisel yöntem kullanılmadan sadece sezgisel yöntemlerle dikdörtgen parçalar kullanılarak iki boyutlu kesme ve paketleme problemine çözüm aranması amaçlanmıştır. Çalışmadaki temel amaç, endüstriyel ve imalat sektörlerinde kullanılan malzemeden (sac metal, alüminyum, cam, kâğıt) maksimum verim alınacak şekilde bir planlama yapmaktır. Bu planlamada ise, kullanılan malzemeden elde edilecek olan atık (fire) değeri oldukça önemlidir. Fire değeri ne kadar az olursa, verimlilik de o kadar fazla olur. Fire değeri, kullanılan malzemeden istenilen parçaların kesilmesiyle doğrudan bağlantılıdır. Kesim işleminin iyi yapılması için de endüstriden endüstriye farklılık gösteren malzeme üzerine yerleştirilecek olan parçaların (şekillerin) maksimum bir şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Yerleştirme işlemlerinin verimli bir şekilde gerçekleşmesi için geliştirilmiş alt-sol [6], alt-sol dolgu [7], uygun olmayan çokgenler [8] ve ilk uygun azalan sezgisel algoritmalarından [9] oluşan birleştirilmiş bir yöntem ele alınmıştır.

Bu çalışma kapsamında, ikinci bölümde, yerleşim planlarının oluşturulması için geliştirilmiş alt-sol ve alt-sol dolgu yerleşim yöntemleri, üçüncü bölümde, yerleştirme işleminde kullanılacak olan dikdörtgen parçalar arasında oluşabilecek geometrik çakışmayı önlemek için kullanılan uygun olmayan çokgenler yöntemi, dördüncü bölümde, parçaların yerleştirilmesi için seçim algoritması olarak ilk uygun azalan sezgisel algoritması, beşinci bölümde, bu çalışmadaki kesme ve paketleme probleminin çözümü için nasıl bir yaklaşımın uygulandığı, altıncı bölümde, yerleştirme işlemleri için kullanılan veri setleri, yedinci bölümde, yerleştirme işleminin gerçekleşmesi için kullanılan birleştirilmiş sezgisel yöntemler ile ilgili geliştirilen uygulamalar ve son bölümde ise, yapılan çalışmalara dair sonuçlar yer almaktadır.

2. GELİŞTİRİLMİŞ ALT-SOL VE ALT-SOL DOLGU YERLEŞİM YÖNTEMİ (IMPROVED BOTTOM-LEFT AND BOTTOM-LEFT FILL PLACEMENT METHOD)

Kesme ve paketleme problemini çözmek için kullanılan yaklaşımlardan biri, sırasıyla, yerleştirme işlemi için kullanılacak olan parçaları belirli bir sıraya bırakmak, daha sonra en alttaki ve en soldaki en uygun konumu seçmek ve bu konuma parçaları sırasıyla yerleştirmektir.

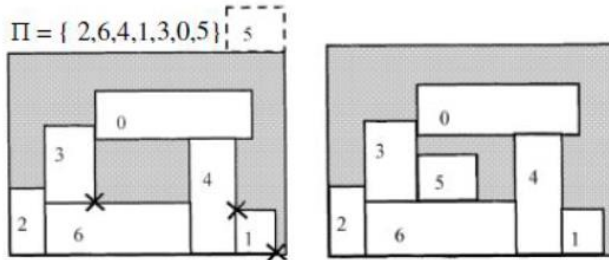
Literatürde bu işlem, bir alt-sol yerleştirme politikası olarak bilinmektedir. Bu yerleştirme işlemlerini gerçekleştirmek için alt-sol yerleşim algoritmaları kullanılmaktadır. Literatürde üç önemli alt-sol yerleşim algoritması bulunmaktadır. Bunlardan ilki 1996 yılında Jakobs tarafından kullanılmıştır [10]. Jakobs, girdi olarak yerleştirilecek olan dikdörtgen parçaların bir listesini tutar ve her bir parçayı sırayla yerleştirme yapılacak alana/yüzeğe yerleştiren alt-sol yöntemini kullanmaktadır. Yerleştirme işleminde, öncelikle yerleştirilecek olan dikdörtgen sağ üst konuma yerleştirilmekte ve mümkün olduğu kadar aşağı ve sola kaydırılarak art arda hareket ettirilmektedir. İkinci algoritma ise, 1999 yılında Liu ve Teng tarafından kullanılan geliştirilmiş alt-sol yerleşim algoritmasıdır [11]. Bu algoritmada, kaydırma yöntemi kullanılarak yerleştirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Liu ve Teng, aşağı doğru hareketin mümkün olmadığı durumlarda sadece sola kayma işleminin gerçekleşmesi için aşağı doğru hareket önceliği veren geliştirilmiş bir alt-sol sezgisel yerleşim yöntemi geliştirmişlerdir. Geliştirilmiş alt-sol algoritması, aynı alt-sol algoritmasında olduğu gibi yerleştirilecek olan parça öncelikle sağ üst konuma yerleştirilmekte ve Şekil 1'de gösterildiği gibi bu parça olabildiğince aşağı doğru ve daha sonra altında kalan parçanın üst kenarı boyunca bir köşeyle karşılaşınca kadar sola doğru hareket ettirilmektedir. Bir köşeyle karşılaştıktan sonra bu parça yine aşağı doğru ve sonra tekrar olabildiğince sola doğru hareket ettirilmektedir. Bu şekilde tüm parçalar yerleştirilinceye kadar işlemler devam ettirilmektedir. Liu ve Teng tarafından geliştirilen alt-sol yerleşim yönteminde, Jakobs yerleşim yönteminden farklı olarak, yerleşim işleminde kullanılan dikdörtgen parçalar için aşağı yönde hareket önceliklidir ve geliştirilmiş alt-sol yerleşim algoritmasıyla daha iyi yerleşim planları elde edilmektedir. Geliştirilmiş alt-sol algoritması ile gerçekleştirilen yerleştirme işlemi Şekil 1'de gösterildiği gibi π permütasyonu ile ifade edilebilmektedir.



Şekil 1: Geliştirilmiş alt-sol algoritması (Improved bottom-left algorithm) [12]

Yerleştirme işlemlerinde kullanılan algoritmalarından biri de alt-sol dolgu algoritmasıdır. Alt-sol dolgu algoritması, yerleşim modelinde mevcut boş alanlara uygun parçaların yerleştirildiği bir yöntemi kapsamaktadır [13]. Bu algoritma, Şekil 2'de gösterildiği gibi parçaları daha önce konumlandırılmış olanlarla örtüşmeden, yerleştirme

işleminin yapılacağı yüzeyin alt-sol yerine mümkün olduğu kadar sırayla ve boşlukları doldurarak yerleştirmeyi içermektedir. Bu çalışma kapsamında yerleştirme işlemleri için geliştirilmiş alt-sol ve alt-sol dolgu algoritmaları kullanılmaktadır.

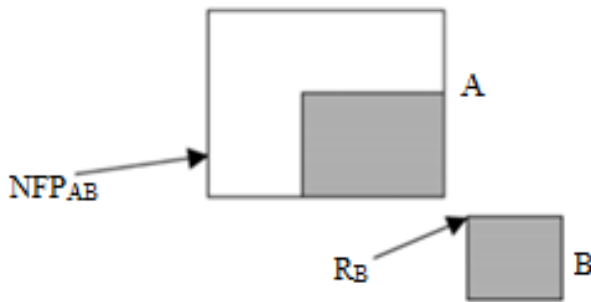


Şekil 2. Alt-sol dolgu algoritması (Bottom-left fill algorithm) [9]

3. UYGUN OLMAYAN ÇOKGENLER YÖNTEMİ (NO-FIT POLYGONS (NFP) METHOD)

Uygun olmayan çokgenler, düzenli ve düzensiz şekilleri/parçaları içeren kesme ve paketleme problemlerinde yerleştirilecek olan parçalar arasında çakışma olup olmadığını test etmek için kullanılan güçlü bir veri yapısıdır. 1966 yılında Art tarafından “şekil kaplama” olarak tanımlanan bu trigonometrik tekniğin ardındaki fikir şu şekilde ortaya çıkmıştır [14]:

Verilen iki çokgenden, A (sabit parça) ve B (A sabit parçanın etrafında dönen parça), B çokgeni üzerinde R_B bir referans noktası olmak üzere, B ile bağlantılı A çokgeninin uygun olmayan çokgeni NFP_{AB} olarak ifade edilmektedir. Bu NFP_{AB} , Şekil 3’te gösterildiği gibi örtüşme olmadan A çokgeninin sınırı etrafında B çokgeni kaydırıldığında R_B referans noktası tarafından izlenen noktalar kümesidir. Her iki şekil arasındaki etkileşime göre üç durum ortaya çıkabilir. Çokgen B, referans noktasının NFP_{AB} içinde olacağı şekilde yerleştirilmişse, çokgen A ile çakışır; Referans noktası NFP_{AB} ‘nin sınırındaysa, çokgen B çokgen A’ya değeri, ama çakışma olmaz. Son olarak, referans noktası NFP_{AB} ‘nin dışındaysa, A ve B çokgenleri üst üste gelmez veya dokunmaz.



Şekil 3. A ve B çokgenleri tarafından üretilen NFP_{AB} (NFP_{AB} produced by polygons A and B)

Literatürde bulunan bazı uygulamalarda görülenlerden farklı olarak, genellikle çokgen B’nin çokgen A ile örtüşüp örtüşmediğini tespit etmek için uygun olmayan çokgen yöntemi kullanılmaktadır. Ancak burada bu geometrik araç ideal bir ortam elde etmek için alt-sol ve

alt-sol dolgu sezgisel yerleştirme yöntemleri ile birleştirilmiştir. Uygulamamız için, A ve B’nin iki rastgele nokta kümesini içeren Minkowski toplamı kullanılarak, uygun olmayan çokgen yapımı gerçekleştirilmiştir. Minkowski toplamı, denklem 1’de gösterildiği gibi A’daki her noktayı B’deki her noktaya ekleyerek elde edilir.

$$A \oplus B = \{a + b : a \in A, b \in B\} \quad (1)$$

4. İLK UYGUN AZALAN SEZGİSEL ALGORİTMASI (FIRST-FIT DECREASING HEURISTIC ALGORITHM)

İlk uygun azalan sezgisel algoritması, Coffman tarafından 1980 yılında geliştirilmiştir [15]. Bu sezgisel algoritmanın uygulanması şu şekildedir. Öncelikle, yerleştirilecek olan dikdörtgen parçaların alanları hesaplanır ve alanlarına göre büyükten küçüğe doğru sıralanır. Daha sonra, yerleştirme yapılacak yüzeye alan en büyük olan dikdörtgen parça ile yerleştirme işlemi başlar. Eğer yerleştirilebiliyorsa, bir sonraki alan en büyük olan dikdörtgen parçanın yerleştirilmesi gerçekleştirilir. Yerleştirme işlemleri gerçekleştirilirken, geliştirilmiş alt-sol veya alt-sol dolgu yerleştirme algoritmalarından biri seçilir. Yerleştirme yapılacak yüzeye tüm parçalar yerleştirilinceye kadar işlemler devam eder. Bu sezgisel algoritmanın kullanılmasının avantajı, boşlukların en verimli bir şekilde kullanılmasıdır.

5. ÇÖZÜM YAKLAŞIMI (SOLUTION APPROACH)

Bu çalışmada, dikdörtgen parçaların yerleştirme işlemleri için ikinci bölümde anlatılan geliştirilmiş alt-sol ve alt-sol dolgu yerleşim yöntemleri, yerleştirilecek olan dikdörtgen parçalar arasında olabilecek çakışma durumunu önlemek için üçüncü bölümde anlatılan uygun olmayan çokgen yöntemi ve seçim algoritması olarak da dördüncü bölümde anlatılan ilk uygun azalan sezgisel algoritması birleştirilerek iki boyutlu dikdörtgen şekillerin kesme ve paketleme problemlerine çözüm aranmaktadır. Bu çözüm yönteminde, yerleştirilecek olan dikdörtgen parçalar alanlarına göre büyükten küçüğe doğru sıralanmaktadır. Yerleştirme işleminde ise, yerleştirilecek olan dikdörtgen parçalar için başlangıç noktası sol-üst köşe alınarak yerleşim işlemi gerçekleştirilmektedir. Yerleştirme işlemi en fazla alana sahip dikdörtgen parça ile başlamaktadır ve daha sonra yerleştirilecek olan diğer dikdörtgen parçalar alanlarına göre uygun konumlara yerleştirilmektedir. Ayrıca, yerleştirilecek olan dikdörtgen parçalar döndürülebilmektedir. Önerilen çözüm yaklaşımı için geliştirilen algoritma adımları şu şekildedir.

Adım 1: Genişliği W ve yüksekliği H olan yerleştirme işlemi için kullanılacak dikdörtgen yüzeyi ve genişlikleri w_i ve yükseklikleri h_i , $i = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ olacak şekilde yerleştirilecek olan n tane dikdörtgen parçayı belirle.

Adım 2: Yerleştirme işlemi için kullanılacak olan dikdörtgen parçaları alanlarına göre büyükten küçüğe doğru sırala.

Adım 3: Yerleştirilecek olan dikdörtgen parçalardan alanı büyük olanı başlangıç olarak belirlenen sol-üst köşeye yerleştir.

Adım 4: Yerleştirme işlemi için kullanılacak mevcut boş yerleri belirle.

Adım 5: Mevcut olan boş yerlere geometrik çakışma olup olmadığı kontrol edilerek yerleştirilecek olan dikdörtgen parçaları alanlarına göre azalan sırada yerleştir.

Adım 6: n tane dikdörtgen parça yerleştirildikten sonra Adım 7'ye git.

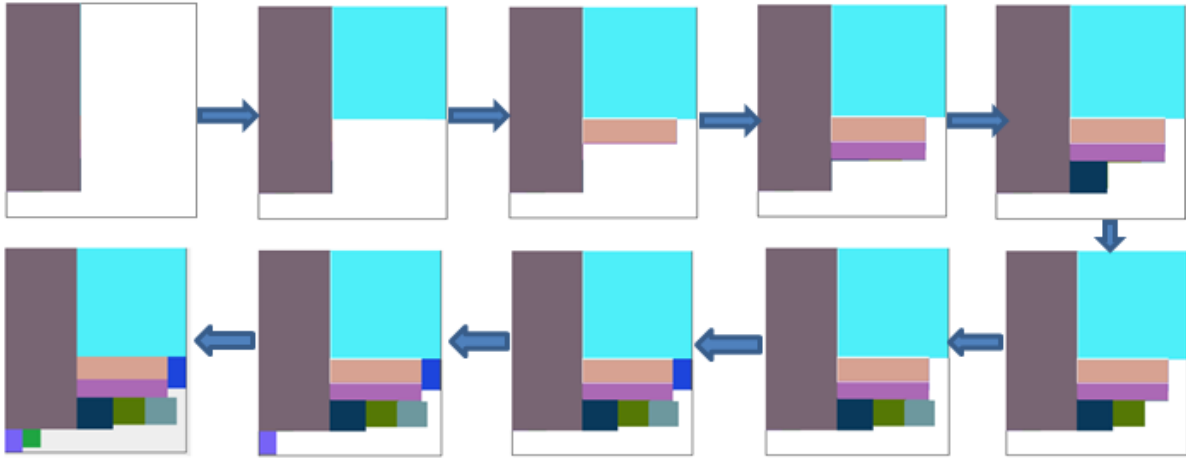
Adım 7: Bitir.

$$\text{Verimlilik} = (KA / BYA) * 100 \quad (2)$$

$$\text{Fire} = ((BYA - KA) / BYA) * 100 \quad (3)$$

Büyük yüzeyin alanı (BYA), yerleştirme yapılacak yüzeyin toplam alanıdır. Kullanılan alan (KA) ise, yerleştirme yapılacak yüzey üzerine yerleştirilen dikdörtgen parçaların alanları toplamıdır. Verimlilik değeri, yerleştirme işlemi için kullanılan yüzeyin kaçta kaçının kullanıldığını göstermektedir. Fire değeri ise, yerleştirme işlemi yapılan yüzeyde kullanılmayan alanı göstermektedir.

Yerleştirme yapılacak yüzey boyutları (Genişlik x Yükseklik) = 40×45 , Yerleştirme işlemi için kullanılacak dikdörtgen parça sayısı 10 ve bu dikdörtgen parçaların boyutları (genişlik ve yükseklikleri) $\{(16,40), (24,24), (20,5), (20,4), (8,7), (7,6), (7,6), (4,7), (4,5), (4,4)\}$ şeklinde verilmiş olsun. Önerilen çözüm yaklaşımı için geliştirilen algoritma adımları kullanılarak gerçekleştirilen örnek uygulamada 10 adet dikdörtgen parçanın yerleşim işlem adımlarının gösterimi Şekil 4'teki gibidir.



Şekil 4. Önerilen çözüm yaklaşımı için geliştirilen örnek uygulama (Sample application developed for proposed solution approach)

6. VERİ SETİ (DATASET)

Çalışmada, 11 farklı veri seti kullanılmıştır. Yerleştirilecek olan farklı sayıda dikdörtgen parça için problem numarası PNo , yerleştirme işlemi için kullanılan yüzeyin boyutları YB , dikdörtgen parçaların genişliği w_i , yüksekliği h_i ve $i = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ olmak üzere 11 farklı veri seti için kullanılan dikdörtgen parçaların genişlik ve yükseklikleri Çizelge 1-8'de verilmiştir. Çizelge 1-8, P1 – P11 çalışmalarında kullanılan dikdörtgen parçalara ait yükseklik (H), genişlik (W) ve adet (Adt) bilgilerini göstermektedir. Çizelge 1-8'de W, yerleştirilecek olan dikdörtgen parçanın genişliğini, H, yerleştirilecek olan dikdörtgen parçanın yüksekliğini ve Adt ise, yerleştirilecek olan dikdörtgen parçadan kaç adet yerleştirileceğini ifade etmektedir.

Çizelge 1. P1 ve P2 [17] veri seti özellikleri (Specifications of P1 and P2 dataset)

| | W | H | Adt | | W | H | Adt |
|---------------|----|----|-----|---------------|----|----|-----|
| P1 YB (90x50) | 40 | 20 | 1 | P2 YB (40x40) | 7 | 6 | 2 |
| | 20 | 20 | | | 4 | 4 | 1 |
| | 30 | 30 | | | 16 | 40 | |
| | 30 | 20 | | | 8 | 7 | |
| | 30 | 10 | | | 20 | 5 | |
| | 40 | 10 | | | 20 | 4 | |
| | 10 | 10 | | | 24 | 24 | |
| | 20 | 10 | | | 4 | 7 | |
| | 50 | 10 | | | 4 | 5 | |

Çizelge 2. P3 ve P4 [18] veri seti özellikleri (Specifications of P3 and P4 dataset)

| P3 (YB=100x80) | W | H | Adt | P4 YB (20x22) | W | H | Adt |
|----------------|----|----|-----|---------------|---|----|-----|
| | 20 | 40 | 1 | | 4 | 1 | 2 |
| | 40 | 10 | | | 4 | 5 | |
| | 30 | 10 | | | 9 | 4 | |
| | 10 | 10 | | | 3 | 5 | |
| | 20 | 20 | | | 3 | 9 | |
| | 10 | 30 | | | 1 | 4 | |
| | 30 | 10 | | | 5 | 3 | |
| | 20 | 10 | | | 5 | 5 | |
| | 20 | 20 | | | 7 | 2 | |
| | 30 | 50 | | | 9 | 3 | |
| | 30 | 30 | | | 3 | 13 | |
| | 50 | 10 | | | 2 | 8 | |
| | 20 | 30 | | | 2 | 15 | 4 |
| | | | | | | 5 | 4 |
| | | | 10 | 6 | | | |
| | | | 7 | 2 | | | |

Çizelge 3. P5[17] ve P6 [4] veri seti özellikleri (Specifications of P5 and P6 dataset)

| P5 YB (30 X 54) | W | H | Adt | P6 YB (20 X 32) | W | H | Adt |
|-----------------|----|----|-----|-----------------|----|----|-----|
| | 23 | 9 | 1 | | 3 | 9 | 1 |
| | 14 | 6 | | | 3 | 12 | |
| | 19 | 4 | | | 6 | 3 | |
| | 6 | 6 | | | 11 | 3 | |
| | 12 | 21 | | | 9 | 3 | |
| | 5 | 4 | | | 6 | 2 | |
| | 6 | 4 | | | 5 | 2 | |
| | 4 | 6 | | | 8 | 3 | |
| | 7 | 13 | | | 11 | 5 | |
| | 9 | 4 | | | 11 | 12 | |
| | 7 | 6 | | | 5 | 12 | |
| | 14 | 11 | | | 8 | 5 | |
| | 23 | 6 | | | 3 | 6 | |
| | 4 | 7 | | | 5 | 4 | |
| 16 | 6 | 11 | 6 | | | | |
| 8 | 4 | 3 | 11 | | | | |
| 4 | 14 | | | | | | |

Çizelge 4. P7 veri seti özellikleri (Specifications of P7 dataset) [18]

| P7 YB (40 X 18) | W | H | Adt | W | H | Adt |
|-----------------|----|---|-----|----|---|-----|
| | 11 | 3 | 1 | 11 | 3 | 1 |
| | 13 | 3 | | 2 | 3 | |
| | 9 | 2 | | 5 | 4 | |
| | 7 | 2 | | 6 | 4 | |
| | 9 | 3 | | 12 | 2 | |
| | 7 | 3 | | 1 | 2 | |
| | 11 | 2 | | 3 | 5 | |
| | 13 | 2 | | 13 | 5 | |
| | 11 | 4 | | 12 | 4 | |
| | 13 | 4 | | 1 | 4 | |
| | 3 | 5 | | 5 | 2 | |
| | 11 | 2 | | 6 | 2 | |
| | 2 | 2 | | | | |

Çizelge 5. P10 veri seti özellikleri (Specifications of P10 dataset)

| P10 YB (18 X 26) | W | H | Adt |
|------------------|---|---|-----|
| | 2 | 2 | 14 |
| | 3 | 3 | 14 |
| | 4 | 4 | 6 |
| | 1 | 1 | 20 |
| | 5 | 5 | 2 |
| | 6 | 6 | 3 |
| | 2 | 6 | 1 |

Çizelge 6. P8 veri seti özellikleri (Specifications of P8 dataset) [18]

| P8 YB (60 X 32) | W | H | Adt | W | H | Adt | |
|-----------------|----|----|-----|----|---|-----|---|
| | 18 | 6 | 1 | 5 | 8 | 1 | |
| | 12 | 2 | | 5 | 7 | | |
| | 7 | 10 | | 5 | 3 | | |
| | 23 | 4 | | 12 | 7 | | |
| | 1 | 4 | | 13 | 7 | | |
| | 7 | 7 | | 6 | 3 | | |
| | 4 | 11 | | 10 | 6 | | |
| | 5 | 6 | | 16 | 9 | | |
| | 7 | 2 | | 4 | 1 | | |
| | 11 | 6 | | 10 | 4 | | |
| | 19 | 10 | | 24 | 6 | | |
| | 5 | 11 | | 25 | 7 | | 1 |
| | 9 | 9 | | 21 | 5 | | |
| | 1 | 2 | | 2 | 4 | | 2 |

Çizelge 7. P9 veri seti özellikleri [17] (Specifications of P9 dataset)

| P9 YB (80 X 84) | W | H | Adt | W | H | Adt |
|-----------------|----|----|-----|----|----|-----|
| | 61 | 38 | 1 | 32 | 4 | 1 |
| | 5 | 72 | | 9 | 33 | |
| | 7 | 4 | | 9 | 15 | |
| | 10 | 7 | | 4 | 8 | |
| | 5 | 52 | | 11 | 7 | |
| | 9 | 5 | | 9 | 34 | |
| | 8 | 10 | | 5 | 8 | |
| | 4 | 7 | | 8 | 21 | |
| | 20 | 7 | | 32 | 31 | |
| | 9 | 7 | | 4 | 4 | |
| | 7 | 24 | 5 | 4 | 6 | |
| | 9 | 4 | 5 | 7 | 2 | |
| | 29 | 4 | 7 | 7 | | |
| | 5 | 5 | 5 | 12 | | |

Çizelge 8. P11 veri seti özellikleri (Specifications of P11 dataset) [18]

| P11 YB (60 X 32) | W | H | Adt | W | H | Adt |
|------------------|----|----|-----|----|---|-----|
| | 7 | 5 | 1 | 5 | 4 | 1 |
| | 14 | 5 | | 6 | 7 | |
| | 14 | 8 | | 18 | 5 | |
| | 4 | 8 | | 3 | 5 | |
| | 21 | 13 | | 7 | 3 | |
| | 7 | 11 | | 5 | 3 | |
| | 14 | 11 | | 18 | 4 | |
| | 14 | 5 | | 3 | 4 | |
| | 4 | 5 | | 12 | 2 | |
| | 18 | 3 | | 6 | 2 | |
| | 21 | 3 | 18 | 5 | | |
| | 17 | 11 | 21 | 5 | 1 | |
| | 4 | 11 | 17 | 3 | | |
| | 7 | 4 | 4 | 3 | | |

7. GELİŞTİRİLEN UYGULAMALAR (DEVELOPED APPLICATIONS)

Önerilen çözüm yöntemiyle gerçekleştirilen uygulamalarda hazır olarak alınan 11 adet veri seti üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Veri setinde yerleştirilecek olan dikdörtgen parçaların sayısı, yerleştirme yapılacak yüzeyin boyutları ve yerleştirme işlemi için kullanılacak olan parçaların genişlik ve yükseklikleri bulunmaktadır. Geliştirilen uygulamalarda, Çizelge 1-8'de verilen veri setleri için yerleştirme işlemleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen yerleşim düzeninin optimal çözüme yakınlıkları incelenmiştir. Yerleştirme işlemi için kullanılacak büyük yüzeyin genişliği W , yüksekliği H olsun. Yerleştirme işlemi için kullanılacak olan n tane dikdörtgen parçanın yükseklikleri h_i ve genişlikleri w_i olsun. Yerleştirme yapılacak büyük yüzeyin alanı BYA ve yerleştirilecek olan dikdörtgen parçaların alanları toplamı DP şeklinde

gösterilmekte ve denklem 4 ve denklem 5'teki gibi belirlenmektedir. Burada denklem 6 ve 7'deki eşitlikler sağlanarak yerleştirme işlemleri gerçekleştirilmektedir.

$$BYA = W * H \quad (4)$$

$$DP = \sum_{i=1}^N w_i * h_i \quad (5)$$

$$h_i * w_i \leq H \text{ veya } W, \quad \forall_i \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i * h_i \leq W * H \quad (7)$$

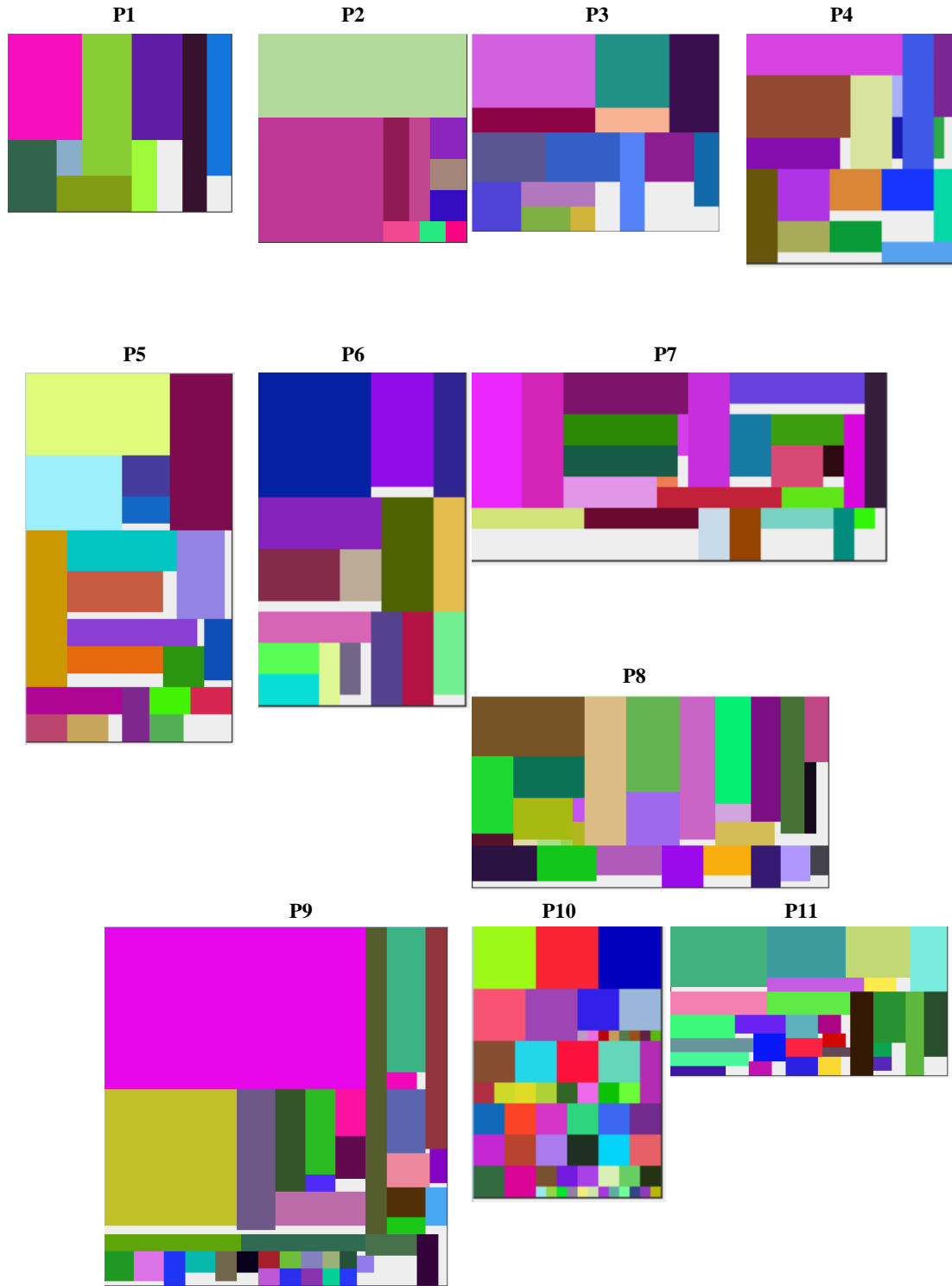
Geliştirilen uygulamalarda, $BYA - DP$ değerinin minimum olması istenmektedir. Bu değer 0 olursa, optimal çözüm elde edilmiş olur. Yani, yerleştirilecek olan dikdörtgen parçaların tümü, yerleştirme işlemi için kullanılan yüzeye yerleştirilmiştir. Verimlilik değeri %100 ve firesiz bir yerleşim olmuştur. Ancak, optimal çözümü elde etmek her zaman mümkün olmayabilir. Bu durumda, elde edilen yerleşim düzenlerinin verimi (performansı) denklem 8'de gösterilen eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\text{verimlilik} = \left(\frac{DP}{BYA} \right) * 100 \quad (8)$$

Önerilen çözüm yaklaşımıyla geliştirilen yazılımda gerçekleştirilen uygulamalar sonucu elde edilen çözümlerden bazıları Şekil 5'te gösterilmiştir.

Uygulamalar java programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Java tabanlı uygulamalar geliştirmek için uygun olan NetBeans IDE 8.2 programı ile intel i7 2.6GHz işlemci özelliklerine sahip bir bilgisayar kullanılmıştır. Geliştirilen uygulamalarda açık gri renkli alanlar fire olarak nitelendirilmektedir. Yerleştirme işlemi için kullanılan yüzeyin boyutları YB , yerleştirilen dikdörtgen parça sayısı DS , verimlilik değeri V ve yerleştirme işleminin gerçekleşmesi için geçen süre (sn) T olmak üzere elde edilen sonuçlar çizelge 9'da gösterilmiştir.

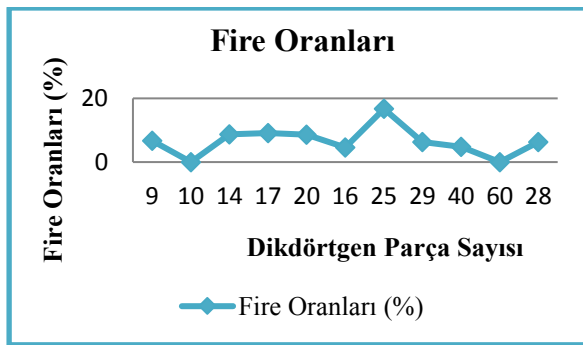
Birleştirilmiş sezgisel yöntemler kullanılarak geliştirilen uygulamalarda parça sayısı ile elde edilen fire oranlarının karşılaştırılması Şekil 6'daki gibidir.



Şekil 5. Yerleştirilen dikdörtgen parçaların renkli alanlarla ve oluşan fire alanının gri alanlarla ifade edildiği örnek uygulamalar (Exemplary applications where the placed rectangular parts are represented with colored areas and trim loss areas are represented by gray areas)

Çizelge 9. Yerleştirme işlemi sonucu verimlilik değerleri (Efficiency values as a result of placement process)

| <i>Çalışma</i> | <i>DS</i> | <i>YB</i> | <i>V</i> | <i>T</i> |
|----------------|-----------|-----------|----------|----------|
| P1 | 9 | 90x50 | %93,33 | 1 |
| P2 | 10 | 40x40 | %100 | 2 |
| P3 | 14 | 100x80 | %91,25 | 1 |
| P4 | 17 | 20x22 | %90,9 | 1 |
| P5 | 20 | 30x54 | %91,35 | 2 |
| P6 | 16 | 20x32 | %95,46 | 1 |
| P7 | 25 | 40x18 | %83,3 | 2 |
| P8 | 29 | 60x32 | %93,75 | 1 |
| P9 | 40 | 80x84 | %95,23 | 3 |
| P10 | 60 | 18x26 | %100 | 2 |
| P11 | 28 | 60x32 | %93,75 | 2 |



Şekil 6. Parça sayısının ve fire oranlarının karşılaştırılması (Comparison of the number of parts and trim loss rates)

Gerçekleştirilen uygulamalardaki amaç, optimal çözümü elde etmektir. Çizelge 9 ve Şekil 6'da elde edilen verimlilik ve fire değerleri göz önüne alındığında P2 ve P10 örnek uygulamalarında optimal çözüme ulaşılmıştır. Diğer uygulamalarda ise, optimal çözüme ulaşılamamış ve belirli fire değerleri elde edilmiştir. Bu fire değerleri % 4,54 ile % 16,7 arasında değişkenlik göstermektedir. Bu uygulamalarda optimal çözüme ulaşılamamasına rağmen, elde edilen fire değerlerinden pek çoğu endüstriler için oldukça iyi ve kabul edilebilir değerler olarak görülmektedir. Örnek uygulamaların çözümü 1-3 saniye arasında gerçekleşmiştir. Bu değerler oldukça iyi ve hızlı çözümler elde edildiğini göstermektedir. Ayrıca, yerleştirilen parçalar arasındaki benzerlik fire değerini etkilemektedir. Parçalar arasındaki benzerlik arttıkça fire değeri azalmaktadır. Örnek olarak P10 uygulamasında yerleştirilen parçalar kare şeklindedir ve firesiz bir yerleşim gerçekleşmiştir. P4 ve P7 uygulamalarında ise, yerleştirilen parçalar farklı boyutlarda dikdörtgen parçalardan oluşmaktadır ve parçalar arasındaki benzerlik diğer uygulamalarda yerleştirilen parçalara göre az olduğundan dolayı en fazla fire değerine sahip çözümler elde edilmiştir.

Çizelge 10-11'de aynı veri seti kullanılarak dikdörtgen parçalar ile kesme ve paketleme probleminin çözümü için [4] ve [5] nolu çalışmalar ile karşılaştırma yapılmış ve önerilen birleştirilmiş sezgisel yöntemin başarımları

kıyaslaması yapılmıştır. [4] nolu çalışmada metasezgisel yöntemlerden GA ve sezgisel yöntemlerden geliştirilmiş alt-sol ve alt-sol dolgu yerleşim yöntemleri kullanılmıştır. [5] nolu çalışmada metasezgisel yöntemlerden GA ve sezgisel yöntemlerden geliştirilmiş alt-sol yerleşim yöntemi kullanılarak çalışmalar yapılmıştır.

Çizelge 10. [4] nolu çalışma ile önerilen yöntemin başarımları karşılaştırılması (Performance comparison of the proposed method with study [4])

| <i>Yöntem</i> | <i>Veri Seti</i> | <i>Verimlilik</i> |
|-----------------|------------------|-------------------|
| [4] | P4 | %87 |
| | P6 | %91 |
| | P7 | %79 |
| | P8 | %88 |
| Önerilen Yöntem | P4 | %90,9 |
| | P6 | %95,46 |
| | P7 | %83,3 |
| | P8 | %93,75 |

Çizelge 10'da [4] nolu çalışma ile önerilen yöntemin 4 farklı veri seti için verimlilik değerleri hesaplanmış ve P4, P6, P7 ve P8 veri setleri için [4] nolu çalışmada sırasıyla %87, %91, %79 ve %88 oranında verimlilik değerleri elde edilmiştir. Aynı veri setleri için önerilen yöntemde ise sırasıyla %90,9, %95,46, %83,3 ve %93,75 verimlilik değerleri elde edilmiş ve [4] nolu çalışmadaki değerlere göre daha yüksek çıkmıştır. Bu verimlilik değerleri göz önüne alındığında, önerilen yöntemin, karşılaştırma yapılan [4] nolu çalışmadaki yöntemden daha başarılı olduğu görülmektedir.

Çizelge 11. [5] nolu çalışma ile önerilen yöntemin başarımları karşılaştırılması (Performance comparison of the proposed method with study [5])

| <i>Yöntem</i> | <i>Veri Seti</i> | <i>Verimlilik</i> |
|-----------------|------------------|-------------------|
| [5] | P2 | %100 |
| | P9 | %96,38 |
| | P11 | %93,75 |
| Önerilen Yöntem | P2 | %100 |
| | P9 | %95,23 |
| | P11 | %93,75 |

Çizelge 11'de [5] nolu çalışma ile önerilen yöntemin 3 farklı veri seti için verimlilik değerleri hesaplanmış ve P2, P9 ve P11 veri setleri için [5] nolu çalışmada sırasıyla %100, %96,38 ve %93,75 oranında verimlilik değerleri elde edilmiştir. Aynı veri setleri için önerilen yöntemde ise sırasıyla %100, %95,23 ve %93,75 oranında verimlilik değerleri elde edilmiş ve [5] nolu çalışmadaki değerler ile karşılaştırıldığında P2 ve P11 veri setleri için aynı verimlilik değerleri elde edilmiştir. P9 veri seti için ise, önerilen yöntem ile [5] nolu çalışmada elde edilen verimlilik değerleri arasında %1,15'lik bir fark oluşmuştur. Ancak her iki çalışmada da elde edilen verimlilik değerleri endüstriler için oldukça iyi değerler

olarak kabul edilmektedir. Bu yüzden önerilen yöntem başarılı olarak kabul edilebilir bir yöntemdir.

8. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, geliştirilmiş alt-sol ve alt-sol dolgu yerleşim yöntemleri, uygun olmayan çokgen ve ilk uygun azalan sezgisel yöntemleri birleştirilerek dikdörtgen parçalar ile düzenli iki boyutlu kesme ve paketleme problemlerine çözüm aranmıştır. Amaç, yerleşim işleminde optimal çözümü (firesiz yerleşim) elde etmektir. Geliştirilen sezgisel yazılım ile hazır olarak alınan 11 farklı veri kümesi ile 11 farklı çalışma yapılmıştır. Veri kümelerinde yer alan ve yerleştirme işlemi için kullanılacak olan 9, 10, 14, 16, 17, 20, 25, 28, 29, 40 ve 60 farklı parça sayıları için birleştirilmiş sezgisel yazılım çalıştırılmış ve performans incelemesi gerçekleştirilmiştir. P2 ve P10 çalışmalarında firesiz bir yerleşim gerçekleştirilmiştir ve bu çalışmalar ile optimal çözüm elde edilmiştir. Diğer çalışmalarda ise, % 4,54 - % 16,7 arasında fire değeri elde edilmiştir. Önerilen yöntem, [4] ve [5] nolu çalışmadaki yöntemler ile sırasıyla 4 (P4, P6, P7, P8) ve 3 (P2, P9, P11) farklı veri setleri için karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin başarılı olduğu görülmüştür. Elde edilen verimlilik değerleri göz önüne alındığında, önerilen çalışma yönteminin kesme ve paketleme probleminin çözümü için uygun bir yöntem olduğu sonucu çıkarılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Söke A. and Bingül Z., "İki Boyutlu Giyotinsiz Kesme Problemlerinin Benzetilmiş Tavlama Algoritması ile Çözümlerinin İncelenmesi A Study of Simulated Annealing Algorithm for Solutions of Two Dimensional Non-Guillotine Cutting Problems", *Journal of Polytechnic*, 8: 25–35, (2005)
- [2] Burke E. K., Hellier R. S. R., Kendall G. and Whitwell G., "Complete and robust no-fit polygon generation for the irregular stock cutting problem", *European Journal of Operational Research*, 179: 27–49, (2007)
- [3] Dyckhoff H., "A typology of cutting and packing problems", *European Journal of Operational Research*, 44: 145–159, (1990)
- [4] Mancapa V., Van Niekerk T. I. and Hua T., "A Genetic algorithm for two dimensional strip packing problems", *South African Journal of Industrial Engineering*, 20(2): 145–162, (2009)
- [5] Vijay Anand K. and Ramesh Babu A., "Heuristic and genetic approach for nesting of two-dimensional rectangular shaped parts with common cutting edge concept for laser cutting and profile blanking processes", *Computers & Industrial Engineering*, 80: 111–124, (2015)
- [6] Dowsland K. A., Vaid S. and Dowsland W. B., "An algorithm for polygon placement using a bottom-left strategy", *European Journal of Operational Research*, 141: 371–381, (2002)
- [7] Lo Valvo E., "Meta-heuristic Algorithms for Nesting Problem of Rectangular Pieces", *Procedia Engineering*, 183: 291–296, (2017)
- [8] Gomes A. M. and Oliveira J. F., "Solving Irregular Strip Packing problems by hybridising simulated annealing and linear programming", *European Journal of Operational Research*, 171: 811–829, (2006)
- [9] Albayrak E., "İki Boyutlu Dikdörtgen Şekilli Stok Kesme Problemleri için Sezgisel-Metasezgisel Algoritma ve Yazılım Geliştirme", *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2013)
- [10] Jakobs S., "On genetic algorithms for the packing of polygons", *European Journal of Operational Research*, 88: 165–181, (1996)
- [11] Liu D. and Teng H., "An improved BL-algorithm for genetic algorithm of the orthogonal packing of rectangles", *European Journal of Operational Research*, 112: 413–420, (1999)
- [12] Soke A. and Bingul Z., "Hybrid genetic algorithm and simulated annealing for two-dimensional non-guillotine rectangular packing problems", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 19: 557–567, (2006)
- [13] Soke A., "Genetik Algoritma ve Benzetilmiş Tavlama ile İki Boyutlu Giyotinsiz Kesme Problemlerine Olasılıksal Yaklaşım", *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2003)
- [14] Junior B. A., Pinheiro P. R. and Saraiva R. D., "A hybrid methodology for nesting irregular shapes: Case study on a textile industry?", *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 6: 15–20, (2013)
- [15] Fırat H., "İmalat Sektöründe Parça Yerleştirme ve Kesme Probleminin Optimizasyonu", *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2018)
- [16] Ergün K., "Kesme ve Paketleme Problemleri ve Araştırmaya Yönelik Bir Metot Geliştirilmesi ve Bu Metodun Etkinliğinin Sınanması", *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2004)
- [17] Burke E. K., Kendal G., Whitwell G. "A new placement heuristic for the orthogonal stock-cutting problem", *Operations Research*, 52(4): 655–671, (2004)
- [18] Euro Special Interest Group on Cutting and Packing, *Listing Gallery: Data Sets 2D-Rectangular*. Available from https://paginas.fe.up.pt/~esicup/datasets?category_id=3 (Erişim Tarihi: 01 Ocak 2019)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Heterojen medikal IoT verilerinin depolanmasında ilişkisel olmayan veritabanına dayalı bir yaklaşım

An approach to non-relational database-based in the storing of heterogeneous medical IoT data

Yazar(lar) (Author(s)): Hüseyin POLAT¹, Saadin OYUCU²

ORCID¹: 0000-0003-4128-2625

ORCID²: 0000-0003-3830-3039

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Polat H. ve Oyucu S., “Heterojen medikal IoT verilerinin depolanmasında ilişkisel olmayan veritabanına dayalı bir yaklaşım”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 989-998, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.477311

Heterojen Medikal IoT Verilerinin Depolanmasında İlişkisel Olmayan Veritabanına Dayalı Bir Yaklaşım

Araştırma Makalesi / Research Article

Hüseyin POLAT*, **Saadin OYUCU**

Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 01.11.2018 ; Kabul/Accepted : 22.01.2019)

ÖZ

Modern medikal cihazlar, her türlü temel medikal veriyi üretme ve iletebilme kabiliyetine sahip olmuşlardır. Bu cihazlar, birbirleriyle veri paylaşabilir veya bulutta merkezi bir platforma veri gönderebilir. Sağlık endüstrisinde yeni trend, her zaman ve her yerden erişilebilecek şekilde, buluttan sunulan elektronik medikal kayıtlarla entegre bir tıbbi izleme sisteminin oluşturulmasıdır. Hacmi gittikçe artan heterojen medikal verilerin düşük maliyetle, hızlı ve güvenli bir şekilde veritabanı sisteminde depolanması, verilerin aktarılması, paylaşılması ve görselleştirilmesi esastır. Bu çalışmada heterojen medikal verileri algılayıcılardan toplamak, verileri görselleştirmek ve depolamak için farklı veritabanı sistemlerini kullanabilecek şekilde bir medikal Nesnelerin İnterneti (medical Internet of Things – mIoT) platformu gerçekleştirilmiştir. mIoT platformu üzerinde dört farklı veritabanı modeli dört farklı senaryo ile test edilmiştir. Bu senaryolarda mIoT platformunda kullanılan veritabanı modellerinin performansları; sorgu süresi, veri hazırlığı, esneklik, güvenlik ve ölçeklenebilirlik parametreleri göz önüne alınarak karşılaştırılmıştır. mIoT platformunda kullanılan ilişkisel olmayan veritabanı modelinin (NoSQL: Not only Structured Query Language) okuma/yazma işlemlerinde ilişkisel veritabanı modellerine göre daha verimli çalıştığı, performansının, esnekliğinin ve ölçeklenebilirliğinin ilişkisel veritabanı sistemlerine göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Medikal IoT, veritabanı performansı, SQL, NoSQL veri tabanları elemanlar analizi.

An Approach to Non-Relational Database-Based in the Storing of Heterogeneous Medical IoT Data

ABSTRACT

Modern medical devices have the ability to producing and transmitting all kinds of basic medical data. These devices can share data with each other or send data to a central platform in the cloud. The new trend in the healthcare industry is the creation of a medical monitoring system integrated with electronic medical records that presented from the cloud, that can be accessed anytime and anywhere. It is essential to store, transfer, share and visualize large volume heterogeneous medical data in a low-cost, fast and secure database system. In this study, a medical Internet of Things (mIoT) platform that can use different database systems was realized in order to acquisition heterogeneous medical data from sensors to visualize and store data. Four different database models on mIoT platform were tested with four different scenarios. The performance of the database models used in the mIoT platform in these scenarios; query time, data preparation, flexibility, security and scalability parameters were compared. It was observed that the non-relational database model (NoSQL: Not only Structured Query Language) used on the mIoT platform was more efficient in reading/writing operations than relational database models, and its performance, flexibility and scalability were better than relational database systems.

Keywords: Medical IoT, database performance, SQL, NoSQL databases.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things - IoT), birbirine bağlı nesnelere oluşan, internet vasıtasıyla birbirleriyle haberleşen ve bilgi paylaşımı yapan bir ağ sistemi olarak tanımlanmaktadır. IoT, medikal tabanlı fonksiyonel uygulamaların geliştirilmesine uygundur. IoT sayesinde sağlık hizmetleri daha düşük maliyetle daha kaliteli olarak sunulabilmektedir [1]. Özellikle giyilebilir algılayıcı ve IoT teknolojilerinin kombinasyonu sağlık alanında devrim yapacak güce sahiptir. Giyilebilir algılayıcılar sayesinde doktorlar bir hastanın sağlık durumunu gerçek zamanlı olarak uzaktan

izleyebilmektedir[2]. Nesnelerin interneti uygulamalarının sağlık hizmetleri alanında kullanımı medikal IoT (medical Internet of Things - mIoT) olarak ifade edilmektedir.

mIoT uygulamalarının en önemli bileşenleri, algılayıcılar ile donatılmış ve İletim Denetim Protokolü/İnternet Protokolü (Transmission Control Protocol/İnternet Protocol - TCP/IP) tabanlı iletişim yeteneği kazandırılmış medikal cihazlardır. mIoT uygulamaları sayesinde vücut ısısı, kan basıncı, kan şekeri, kandaki oksijen (SPO2), hava akışı (nefes alma durumu), elektrokardiyogram (EKG) ve hasta konumu gibi medikal veriler toplanabilmektedir [3]. Uzmanlar, hasta tedavisine başlamadan önce hastanın hastalığına ilişkin geçmişten günümüze bütün bilgileri ayrıntılı olarak

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : polath@gazi.edu.tr

öğrenmek istemektedir. Bu bilgiler sayesinde uzmanlar, hastalık ve hastalığın ilerlemesi hakkında bilgi edinmektedir. Bu nedenle çoğu medikal veriler kişilerin sağlık durumunun uzun dönemli takibi ve yaşam kalitesinin artırılması için saklanmalıdır. Kişisel tıbbi kayıtlar, radyoloji görüntüleri, klinik test verileri, insan genetiği, nüfus bilgileri vb. çeşitli bilgiler sürekli olarak kayıt altına alınmaktadır. Kayıt altına alınan medikal verilerin hacmi sürekli artış göstermektedir. Dünya çapındaki medikal verilerin toplam hacminin 2012 yılında 500 petabayt 2020 yılında ise 25.000 petabayt olması beklenmektedir [4].

mIoT uygulamalarında heterojen medikal veriler birden fazla mIoT cihazından sürekli olarak üretilebilir. Bu verilerin görselleştirilmesi, inceleme ve analizi için bulut platformu üzerinde bir veritabanında depolanması gerekmektedir. mIoT uygulamalarında kullanıcıların istenilen medikal veriye kesintisiz, güvenilir ve hızlı bir şekilde ulaşılabilmesi esastır. Bu konudaki gereklilikleri yerine getirebilmek için heterojen ve hacimli medikal verilerin yüksek dağıtım kabiliyetine sahip uygun veritabanı modelleri kullanılmalıdır [4].

Birçok medikal uygulama, verileri depolamak için geleneksel ilişkisel veri tabanı modeli kullanmaktadır. Günümüzde ilişkisel veri tabanlarının büyük öneme sahip olması ve büyük projelerde kullanılması arka planda desteğinin çok iyi olmasındandır. Özellikle Oracle, IBM ve Microsoft gibi dev teknoloji firmalarının desteklemesi ile bu veri tabanları piyasada oldukça fazla yer tutmuştur. İlişkisel veritabanları şu ana kadar basitlik, sağlamlık, esneklik, ölçeklenebilirlik, performans ile birlikte tüm kullanıcı gereksinimlerini desteklemiştir. Fakat büyük hacimli ve heterojen veriler için ilişkisel veritabanlarının etkin bir şekilde veri işleme, ölçeklendirilme, paralel işlem ve maliyet bakımından bazı dezavantajları vardır. Özellikle veri miktarındaki önemli artış ilişkisel veri tabanlarının performansını düşürmektedir [5]. İlişkisel veri tabanlarında performansı arttırmak için yüksek maliyetli sunucu donanımı gerekmektedir. Bir başka husus ise ilişkisel veritabanlarının uygun olmayan statik şemaları, heterojen medikal veriler için en temel sınırlamadır.

İlişkisel veritabanı sistemlerine alternatif bir çözüm olarak ilişkisel olmayan NoSQL (Not only Structured Query Language) veritabanı kavramı ortaya çıkmıştır. NoSQL veritabanı modelleri veri formatından bağımsız ve yatay ölçeklenebilir olmasından dolayı büyük hacimli verileri depolamak için yüksek performans, düşük maliyet ve tek bir sunucu için daha fazla kullanıcı desteği sunmaktadır. Ayrıca NoSQL veritabanı modelleri, önceden tanımlanmış şema ve veriler arasında ilişki olmadan da çalışabilmektedir. Dahası kullanıcıların yapısal sorgu dili (Structured Query Language –SQL) hakkında bilgi sahibi olmaları da gerekmez. HBase, MongoDB, Cassandra ve CouchDB gibi birçok ilişkisel olmayan NoSQL veritabanı modelleri bulunmaktadır [5].

Yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı ilişkisel olmayan veri tabanlarının heterojen mIoT verilerinin

depolanması için maliyet/performans açısından ilişkisel veri tabanlarına göre avantaj sağlayabileceği düşünülmüştür.

Bu çalışmada, mIoT cihazlarının ürettiği heterojen medikal verilerin temel gereksinimleri göz önüne alınarak bir prototip mIoT platformu geliştirilmiştir. mIoT platformu ilişkisel ve ilişkisel olmayan farklı veritabanı modellerini kullanabilecek şekilde tasarlanmıştır. mIoT platformu üzerinde heterojen mIoT verileri kullanılarak ilişkisel ve ilişkisel olmayan dört veritabanı modeli farklı senaryolar ile test edilmiştir. Veritabanı modellerinin sorgu süresi, veri hazırlığı, esneklik, güvenlik ve ölçeklenebilirlikler göz önüne alınarak veritabanları karşılaştırılmıştır. Tüm test senaryolarında ilişkisel SQL ve ilişkisel olmayan NoSQL veritabanlarının heterojen mIoT verileri üzerinden performansları değerlendirilmiştir. Bu sayede mIoT uygulamalarında verimlilik ve performans açısından ilişkisel olmayan veri tabanlarının ilişkisel veritabanlarına göre ne tür avantajlar sağlayabileceği konusuna açıklık getirilmiştir.

1.1. Literatür özeti (Literature review)

Medikal verilerin kapsamlı analizi hasta veya hastalık hakkında karar verme sürecinin kalitesini arttırmaktadır. Ayrıca verilerin uzaktan ve sürekli takibi hastaya daha kolay müdahale edilmesini sağlamaktadır. mIoT ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde farklı hasta profiline hizmet eden birçok uzaktan sağlık izleme sisteminin geliştirildiği görülmüştür. Bu sistemlerin çoğunluğu hızlı veri elde etmek ve düşük maliyetli sistem tasarımı geliştirmeye yoğunlaşmaktadır [6].

mIoT temelli sistemler üzerine yapılan çalışmalar algılayıcılar sayesinde hasta üzerinden çeşitli verileri almaya ve bu verileri merkezi bir sunucu üzerinde saklamaya odaklanmıştır. Cruz J. ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, Kronik Obstrüktif Akciğer Hastalığından (KOA) muzdarip hastaların uzaktan sağlık durumlarını izleme ve uzaktan müdahalelerinde kullanılan metotların kapsamlı bir tanımı sunulmuştur. KOA hastalarının farklı ortamlara ve hava şartlarına olan bağlılığı araştırılmıştır [7]. Kalp yetmezliği hastaları üzerine yapılan bir çalışma da ise hastaların uzaktan izlenmesinde kullanılan elde taşınabilir bir aygıt geliştirilmiştir Bu aygıt sayesinde hasta üzerinden her 15 saniyede bir çeşitli veriler bluetooth ile alınarak, internet bağlantısı olan bir cihaz sayesinde merkezi bir veritabanı sunucusuna gönderilmektedir [8]. Yunus Msayib ve arkadaşları yapmış oldukları bir çalışmada diz ağrıları olan hastaların durumlarını ve egzersiz çalışmalarını izlemek için bir uygulama geliştirmişlerdir. Hasta üzerinde bulunan ivmeölçer ve jiroskop algılayıcılarından alınan veriler internet yardımı ile merkezi bir sunucuya aktarılmaktadır. Diz bükülme açıları ve günde kaç defa büküldüğü bilgisi alınarak doktorlar tarafından değerlendirilmiştir [9].

Yeni doğan bebeklerin takibi [10], kalp rahatsızlıklarının izlenmesi ve tespiti [11-12], uzaktan kan şekeri seviyesinin izlenmesi ve erken uyarı sistemleri gibi

birçok mIoT tabanlı uygulama geliştirilmiştir [13]. Daha karmaşık bir çalışmada ise vücut hareketlerinin hayati bulguları arasında olan kalp hızı, solunum hızı, cilt sıcaklığı ve ivmeölçer ile elde edilen hareket verileri alınarak hasta sürekli olarak izlenmiştir. Bu verilerin yüksek veya düşük eşik değerlerine göre hasta ve ilgili kişilere uyarılar da bulunulmuştur [14].

Yapılan çalışmalar göz önüne alındığında uzaktan sağlık izleme sistemlerinin IoT uygulamalarının yaygınlaşması ile ivme kazandığı görülmektedir. IoT sayesinde uzaktan hasta izleme sistemlerinin geliştirilmesi kolaylaştırılmış, fonksiyonelliği ve uygulama sayısı artmıştır. Örneğin yüksek tansiyondan kaynaklanan kalp sorunları için IoT teknolojisine dayanan düşük maliyetli ve kullanımı kolay bir uzaktan izleme sistemi önerilmiştir. Bu çalışmada veriler Yapısal Sorgulama Dili (SQL: Structured Query Language) veritabanı olarak ta bilinen merkezi bir ilişkisel veritabanı sunucusunda saklanmıştır [15]. Diğer bir çalışmada ise yaşlı bir kişinin günlük faaliyetlerini kendi yaşantısını engellemeyecek şekilde tamamlamasına yardımcı olunması, aynı zamanda aile bireylerinin ve yaşlı bakım görevlilerinin yaşlı kişiyi takip etmesi için bir uygulama geliştirilmiştir [16].

mIoT uygulamaları sağladığı faydaların yanı sıra beraberinde bazı sorunları da beraberinde getirmiştir. Örneğin hasta üzerinden alınan ve büyük hacimlere ulaşan verilerin depolanması, entegrasyonu, yorumlanması ve yönetilmesi önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır [17]. Medikal alanda geliştirilen uygulamalar incelendiğinde birçok çalışma da merkezi bir veritabanı sunucusunun yer aldığı ve bu verilerin merkezi bir veritabanına kaydedildiği görülmektedir. Ayrıca her uygulamanın farklı bir veritabanı yönetim sistemini kullanıldığı görülmüştür.

Birçok çalışmada kolay kullanımı ve ücretsiz olması nedeni ile MySQL ilişkisel veritabanı tercih edilmiştir [15-20]. Aynı zamanda, Microsoft SQL Server ilişkisel veritabanı [21-22], PostgreSQL ilişkisel veritabanı [23-24] ve SQLite ilişkisel veritabanını kullanan uygulamalara da rastlanılmıştır [25]. SQL'in hız ve performans etkisi üzerine çalışan bazı araştırmacılar ise dosya tabanlı yerel sunucular [6] ve nesne ilişkisel veritabanı üzerine çalışmalar yapmışlardır [26]. SQL, dosya tabanlı sunucular ve nesne ilişkisel veritabanlarının performansını araştıran bazı araştırmacılar ise NoSQL üzerine çalışmalar yapmış ve MongoDB kullanarak bir uygulama geliştirip MySQL ile performans karşılaştırması yapmışlardır [27-28]. Paethong ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada veritabanlarının karşılaştırılması Raspberry Pi üzerinde çalışan sistemler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Veri ekleme, silme ve veri seçimi için MySQL ve MongoDB performansı karşılaştırılmıştır [27]. Çalışmada 1 milyon satır veri kullanılmış ve belirtilen test işlemleri zaman ekseninde değerlendirilmiştir. Poulter ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği diğer bir çalışma da ise IoT

uygulamalarında kullanılan web servislerin JSON yapısını destekleyen MongoDB ile hız açısından daha performanslı olacağı belirtilmiştir [28]. Ayrıca MongoDB kullanan birçok uzaktan hasta izleme çalışması da yapılmıştır [5, 29-30].

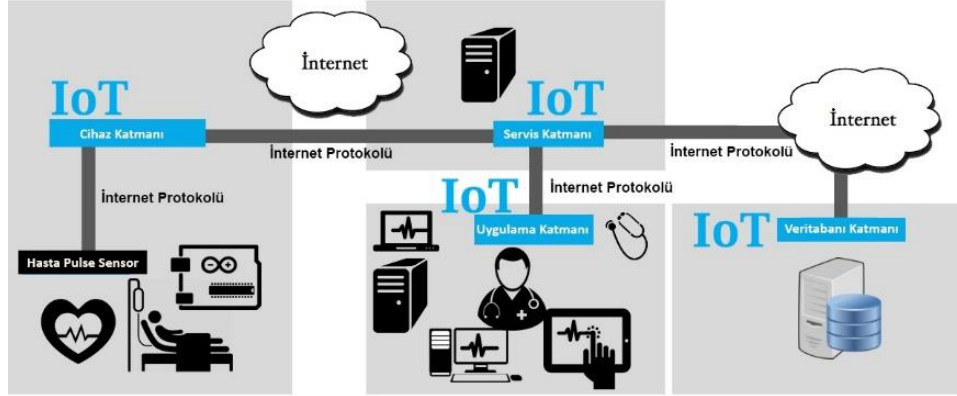
Literatürde uzaktan sağlık izleme alanında birçok farklı hasta profili üzerinde uygulamalar geliştirildiği görülmüştür. Bu uygulama alanlarında IoT teknolojisinin kullanılması ile uygulamaların işlevselliğinin artırıldığı bir gerçektir. Yapılan çalışmalarda her uygulamada farklı bir veritabanı sisteminin kullanıldığı ve mIoT uygulamalarında kullanılan veri tabanlarının etkinliği ve performansları üzerinde az sayıda çalışma yapıldığı görülmüştür.

2. mIoT PLATFORM UYGULAMASI (mIoT PLATFORM APPLICATION)

Bu çalışmada, heterojen mIoT verilerini kullanan ilişkisel ve ilişkisel olmayan veritabanlarının performans testlerini gerçekleştirmek için bir prototip mIoT platform uygulaması geliştirilmiştir. mIoT platform uygulaması, cihaz katmanı, servis katmanı, uygulama katmanı ve veritabanı olmak üzere dört katmanlı bir mimariden oluşmaktadır. Bu katmanların birbirleri ile olan ilişkisi Şekil 1'de gösterilmiştir.

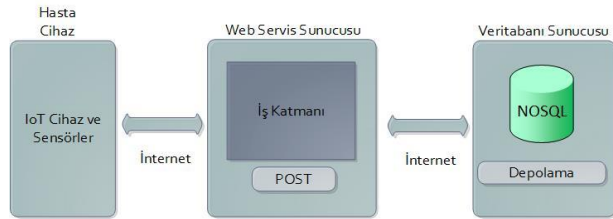
mIoT platform uygulamasının temelinde cihaz katmanı bulunmakta ve bu katman içerisinde algılayıcılar yer almaktadır (Şekil 1). Cihaz katmanı sürekli olarak servis katmanına yazma isteğinde bulunmaktadır. Servis katmanı kendisine gelen okuma veya yazma işlemlerini değerlendirmekte ve yazma işlemi yapacak ise verileri veritabanı katmanına göndererek yazma işlemi gerçekleştirmektedir. Aynı zamanda herhangi bir hastaya ait anlık ve geriye dönük analiz veya rapor istekleri de IoT servis katmanına yapılmaktadır. Uygulama katmanında ise kullanıcı ile etkileşime geçebilecek bir arayüz sayesinde hasta, sağlık personelleri veya hasta yakınları anlık olarak verileri izleyebilmektedir. Uygulama katmanı üzerinden gerçekleştirilen bütün istekler servis katmanında değerlendirildikten sonra işleme alınmaktadır. Kullanıcı tarafından yapılan isteğin niteliğine göre servis katmanı veritabanından veri talep etmekte ve kullanıcıya uygulama katmanı üzerinden istenilen bilgileri sunmaktadır. mIoT platformunda bir veya birden fazla algılayıcı sürekli olarak servis katmanına veri iletebilmektedir. Aynı zamanda bu veriler bir veya birden fazla kullanıcı tarafından farklı analiz ve rapor istekleri için talep edilebilir.

Şekil 2'de geliştirilen mIoT platform uygulamasının blok diyagramı gösterilmiştir. mIoT platform uygulamasında medikal verileri elde etmek için kalp hızı, solunum hızı, cilt sıcaklığı ve ivmeölçer gibi algılayıcılar kullanılmıştır. Bu algılayıcılar üzerinden ölçüm değerleri belirli zaman aralıklarında alınarak mIoT platformunun



Şekil 1. mIoT uygulaması genel mimarisi (mIoT application general architecture)

servis katmanına gönderilmektedir. Örneğin sıcaklık bilgisi her 30 saniyede bir, kalp hızı ölçüm bilgisi ise 60 saniyede bir mIoT platformunun servis katmanına gönderilmektedir. Algılayıcı verilerinin yanında hastaya ait kimlik bilgileri ve hastaya ait özet açıklama bilgisi de belirli zaman aralıklarında IoT platformunun servis katmanına gönderilmektedir. Verileri yazma ve okuma işlemleri web servis sunucusu tarafından yönetilmektedir. mIoT tabanlı cihaz üzerinden alınan verileri web servis sunucusuna göndermek için bir web istemci yazılımı geliştirilmiştir. Web servis sunucusunda ise gelen istekleri karşılamak ve değerlendirmek için RestFUL web servisleri geliştirilmiştir.



Şekil 2. Geliştirilen mIoT uygulaması (Developed mIoT application)

Mesajlaşma yapısı için ise RestFul web servisler ile sorunsuz çalışabilen JSON mesajlaşma yapısı kullanılmıştır. mIoT uygulamalarında hasta üzerinden veri toplayan mIoT destekli cihazlar arasında verilerin sürekli olarak paylaşılabilmesi gerekir. Paylaşılacak istenen veriler her sisteme ve her kullanıcıya standart bir yapıda sunulmalıdır. Bu amaç için Genişletilebilir İşaretleme Dili (XML: Extensible Markup Language) veri yapısı tercih edilebilir. Fakat yapısal, yarı yapısal ve yapısal olmayan verilerin çoğalması ve büyük verilerin devreye girmesi XML'in yerini Javascript Nesne Gösterimi (JSON: Javascript Object Notation)'a bırakmasına neden olmuştur. Popülaritesi gittikçe artan JSON özellikle kendi için özel tasarlanan web servislerle sorunsuz çalışmaktadır.

mIoT cihazlarından elde edilen verilerin veri tabanına JSON veya XML yapısında gönderilmesi gerekmektedir. Fakat SQL veri tabanına depolanmak üzere gelen bir veri, tablo yapısına dönüştürülerek kaydedilmektedir. Bu

durumda veriler, veri tabanına depolanırken veya veri tabanından başka bir platforma gönderilirken tablo yapısı – XML dönüşümü veya tablo yapısı - JSON dönüşümünün sürekli olarak yapılması gerekmektedir. XML dönüşümünün yapıldığı her uygulamada her bir veri için XML başlıklarının oluşturulması gerekmektedir. Bu durum bir veri depolanırken veya veri ağ üzerinde iletilirken boyutunun artmasına neden olmaktadır.

XML yapısında veri tanımlamalarda başlık etiketleri kullanılırken JSON yapısında bu işlem noktalama işaretleri ile basitçe yapılabilmektedir. Etiketleri oluştururken veya veri tabanı işlemleri yaparken XML dönüştürücüler kullanmak gerekir. Fakat JSON yapısı tercih edilirse, JSON yapısına uygun veri tabanı ve uygun web servislerin seçilmesi ile bu dönüşüm gereksinimi ortadan kalkar. Bu sayede veritabanı okuma/yazma ve iletişim hızını arttırmak mümkün olur.

mIoT platform uygulamasının veritabanı katmanında, ikisi açık kaynak kodlu olmak üzere toplam üç farklı ilişkisel veritabanı ve açık kaynak kodlu doküman tabanlı bir NoSQL veritabanı modeli, çeşitli senaryolarda testler gerçekleştirmek amacıyla kullanılmıştır. mIoT platformunda ilişkisel veritabanı olarak MySQL, PostgreSQL, MSSQL ve ilişkisel olmayan veritabanı olarak NoSQL doküman tabanlı MongoDB veri tabanı kullanılmıştır.

mIoT platformunun veritabanı performanslarının test edilmesi amacıyla seçilen veri tabanı modelleri şunlardır;

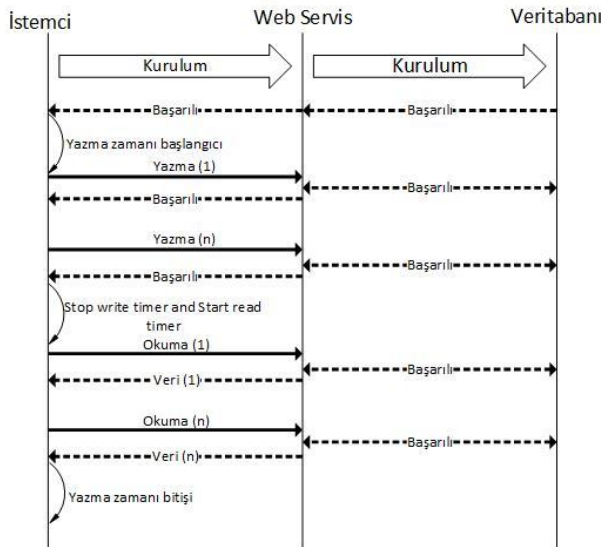
- PostgreSQL açık kaynaklı bir SQL veritabanıdır. 1995 yılından beri yoğun olarak kullanılmaktadır. SQL 2008 standardının çoğunu desteklemek üzere tasarlanmıştır. Ayrıca atomiklik, tutarlılık, izolasyon, dayanıklılık (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability - ACID) uyumludur [31].
- MSSQL Microsoft firmasına ait açık kaynaklı olmayan bir veritabanıdır. Birçok kurumsal projede kullanılmaktadır. SQL standartların çoğunu desteklemektedir.
- MySQL açık kaynaklı bir SQL veritabanıdır. Dünya genelindeki en popüler açık kaynak

veritabanı olan MySQL, hızlı ve düşük maliyetli olma özelliğine sahiptir [32].

- NoSQL veri tabanlarının anahtar (anahtar/değer) depolama türü, belge depolama türü vb. çeşitleri bulunmaktadır. MongoDB doküman tabanlı ve açık kaynaklı bir veritabanıdır.

2.1 mIoT Platformu üzerinde veritabanlarının testi (Testing databases on mIoT platform)

Geliştirilen mIoT uygulamasında kullanılan web servis sunucusu, veritabanı sunucusu ve istemci yapısı sabit kalmış sadece veritabanı sistemi değiştirilmiştir. Böylelikle veritabanına ait performans değerlendirmesinde daha gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. Geliştirilen mIoT uygulamasında yapılacak test işlemleri çoklu okuma ve yazma işlemlerini destekleyecek niteliktedir. Şekil 3'te test işlemleri sırasında sistemin genel durumu gösterilmiştir.



Şekil 3. Test işlemleri sırasında sistemin genel durumu (General status of the system during testing transactions)

mIoT uygulaması için gerekli veriler ve veri yapıları Çizelge 1'de gösterilmiştir. Hastaya ait kimlik bilgileri ve hasta üzerinden yer alan çeşitli algılayıcılar sayesinde alınacak veriler ve veri yapıları açıkça belirtilmiştir. Bununla beraber algılayıcıların ölçüm zaman verileri de mIoT uygulamasına gönderilen veriler arasındadır.

Bu çalışma kapsamında gerekli olan bütün yazılımlar için kullanılan donanımlar ve özellikleri Çizelge 2'de gösterilmiştir. Test amaçlı kullanılan veritabanı sistemleri ve versiyonları ise Çizelge 3'te verilmiştir.

Geliştirilen mIoT uygulamasında web servis sunucusu ve kullanıcılar arasında gerçekleşen veri akış yapılandırması Şekil 4'te, web servis sunucusu ile veritabanı sunucusu arasında gerçekleşen veri akış yapılandırması ise Şekil 5'te gösterilmiştir.

Çizelge 1. mIoT uygulamasında kullanılan veri yapıları (Data structures used in mIoT application)

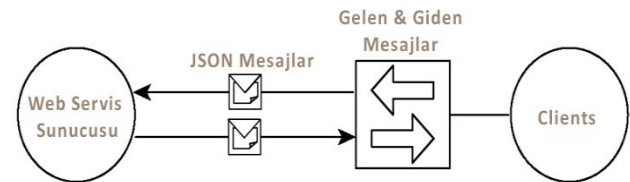
| İsim | Tip |
|----------------|--------|
| Hasta ID | Uuid |
| Hasta Açıklama | String |
| Kalp hızı | Double |
| Solunum hızı | Double |
| Cilt sıcaklığı | Double |
| İvmeölçer | Double |
| Ölçüm zamanı | Date |

Çizelge 2. mIoT uygulamasında kullanılan donanımlar ve özellikleri (Hardware and features used in mIoT application)

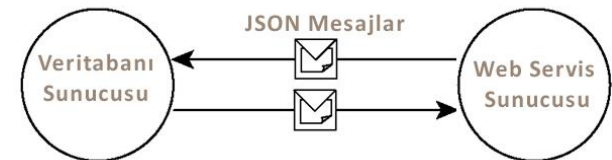
| Donanım Tipi | Web Servis Sunucusu | Veritabanı Sunucusu |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| CPU Tipi | Intel i5 | Intel i5 |
| CPU Çekirdek Sayısı | 4 | 4 |
| CPU Hızı | 3.8 GHZ | 3.8 GHZ |
| Bellek Boyutu | 6 GB | 6 GB |
| Disk Boyutu | 1 TB | 1 TbB |
| Disk Dönüş Hızı | 7200 RPM | 7200 RPM |
| Ağ Hızı | 1 GB/s | 1 GB/s |

Çizelge 3. Veritabanı sistemleri ve versiyonları (Database systems and versions)

| PostgreSQL | MySQL | MongoDB | MSSQL |
|--------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Versiyon 9.3 | Versiyon 5.7.18 | Versiyon 3.2.15 | Versiyon 2014 |



Şekil 4. Web servis sunucusu ve kullanıcılar arasındaki veri akış yapılandırması (Data flow configuration between web service server and users)



Şekil 5. Web servis sunucusu ve veritabanı arasındaki veri akış yapılandırması (Data flow configuration between web service server and database)

Veri akışı sağlandığında veritabanı sunucusundaki veritabanı yönetim sistemi değiştirilerek test işlemleri başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Bunun için sadece bir

bölümden oluşan bir diske sahip veritabanı sunucusu kullanılmıştır. Veritabanı sunucusun yapılandırılması her veritabanı yönetim sisteminin kendi özel durumlarına göre gerçekleştirilmiştir.

3. DENEYSSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Bu çalışmada geliştirilen mIoT platform uygulamasının üzerinde, ilişkisel ve ilişkisel olmayan veritabanı modellerinin performansı çeşitli işlemlerdeki sorgu zamanı ve yazma zamanı perspektifinde değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında hasta sayısı 40 adet olacak şekilde belirlenmiş ve bir ay içerisinde hastalar üzerinden alınabilecek veriler uygulamaya aktarılmıştır. Kullanıcılar üzerinden veri aktarımı sırasında bağlantı 24 saat aktif durumdadır. Her bir hasta üzerinden 1 milyon satır veri toplanmıştır. Ayrıca veri hazırlama, esneklik ve ölçeklenebilirlik konuları tartışılmıştır.

3.1. Okuma / Yazma Zamanı (Read / Write Time)

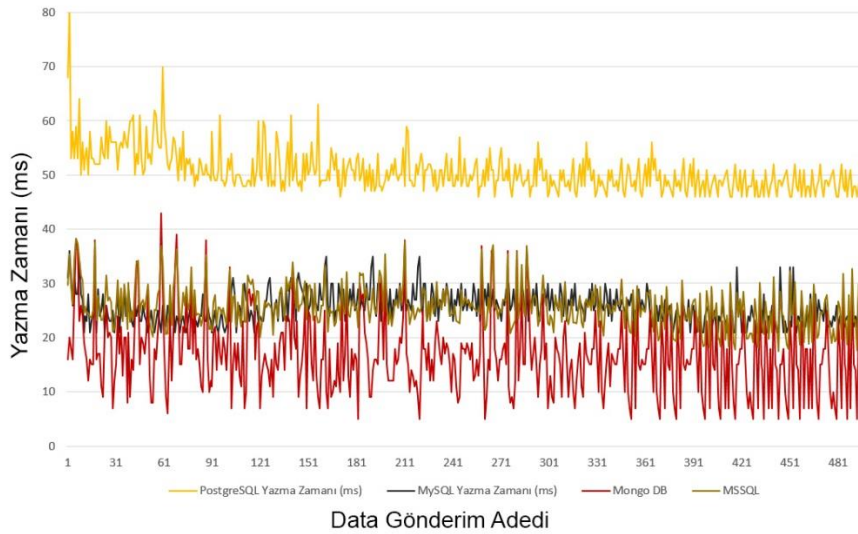
mIoT uygulama verileri için bu çalışmada kullanılan veri tabanlarının performans testleri dört farklı senaryo gerçekleştirilmiştir. Web servis sunucusuna yapılacak olan okuma ve yazma isteklerindeki bu senaryolar şunlardır;

- Tek bir hastaya ait sürekli verilerin yazılması
- Tek bir hastaya ait verilerin okunması
- Birden fazla hastaya ait sürekli verilerin aynı anda yazılması
- Birden fazla hastaya ait verilerin aynı anda okunması

Bu çalışmada kullanılan dört farklı veritabanı (PostgreSQL, MySQL, MongoDB ve MSSQL) için yukarıda belirtilen dört test işlemi senaryosu fiziksel sunucular üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan veri tabanları için belirtilen test senaryolarına ait performans değerlendirilmesi elde edilmiştir.

3.1.1. Tek bir hastaya ait verilerin sürekli yazılması (Continuous writing of data for a single patient)

Algılayıcılar üzerinden gerekli verileri almak için belirli bir süre geçmektedir. Örneğin kalp atış hızını tespit edebilmek için en az 60 sn. geçmesi gerekmektedir. Bu nedenle algılayıcılar üzerinden alınacak veriler 60 sn. ve üzeri bir zamanda web servis sunucusuna gönderilmelidir. Bu senaryoda gerçekleştirilen test işlemlerinde veriler her 75 sn.de bir web servis sunucusuna gönderilmiştir. Test işlemi sonucunda elde edilen verilere ait grafik Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Tek bir hastaya ait verilerin sürekli yazılması (Continuous writing of data for a single patient)

Şekil 5'te görüldüğü gibi MongoDB test edilen diğer veritabanı sistemlerine göre üstünlük göstermektedir. MongoDB veritabanına verilerin yazılması sırasında anlık dalgalanmalar olmaktadır. Örneğin bir önceki verinin 38 ms'de yazma sonucu gönderilirken bir sonraki veri de 8 ms 'de yazma işlemi gerçekleştirilmektedir. MongoDB veritabanında ki bu dalgalanmaya karşın diğer veri tabanlarına göre yazma performansı daha yüksektir.

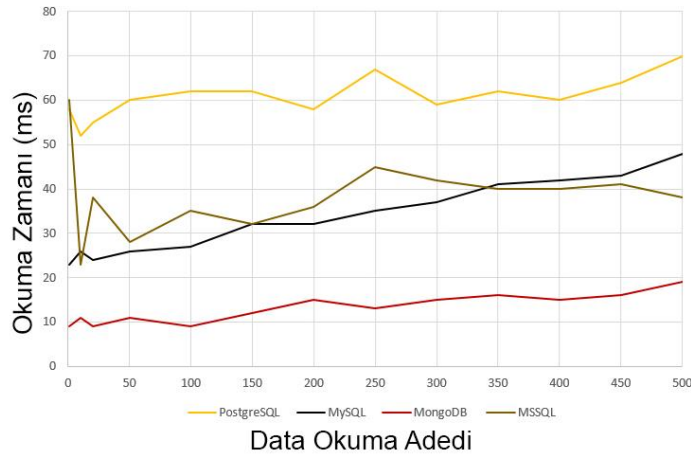
Yazma işlemlerindeki zaman dalgalanması ise en düşük PostgreSQL veritabanında görülmektedir.

3.1.2. Tek bir hastaya ait verilerin okunması (Reading the data of a single patient)

Bu test aşamasında tek bir hastaya ait medikal veriler sadece bir kullanıcı tarafından okunması istenmektedir. Oluşturulan bu senaryoda veri tabanlarının okuma performansı test edilerek elde edilen verilere ait değerler Şekil 7'de gösterilmiştir.

Şekil 7’de görüldüğü gibi MongoDB veritabanından istenilen veri sayısı artmasına karşın okuma zamanındaki performansı düşmemiştir. MongoDB’ye en yakın 23

ms’nin üzerinde okuma işlemlerini gerçekleştirirken MySQL veritabanı yaklaşmaktadır. MongoDB okuma işlemlerini 10 -19 ms arasında gerçekleştirmektedir.

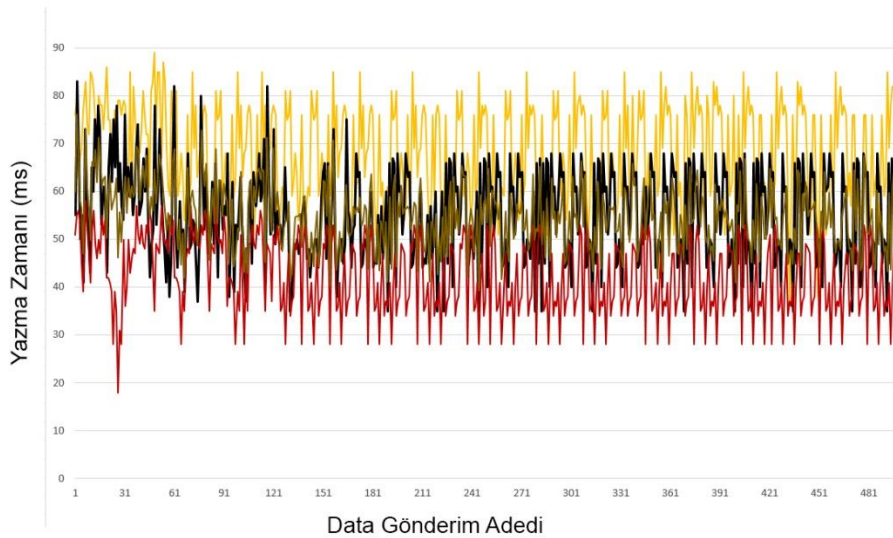


Şekil 7. Tek bir hastaya ait verilerin okunması (Reading the data of a single patient)

3.1.3. Birden fazla hastaya ait sürekli verilerin aynı anda yazılması (Simultaneous writing of data from more than one patient)

Bu test senaryosunda birden fazla hastaya ait sürekli verilerin aynı anda yazılması istenmektedir. Bu nedenle

web servis sunucusuna aynı zaman dilimlerinde farklı hasta verilerinin yazılması isteği yapılmıştır. Bu durumda mIoT uygulamasının cevap verme süresine ait bilgiler Şekil 8’de gösterilmiştir.



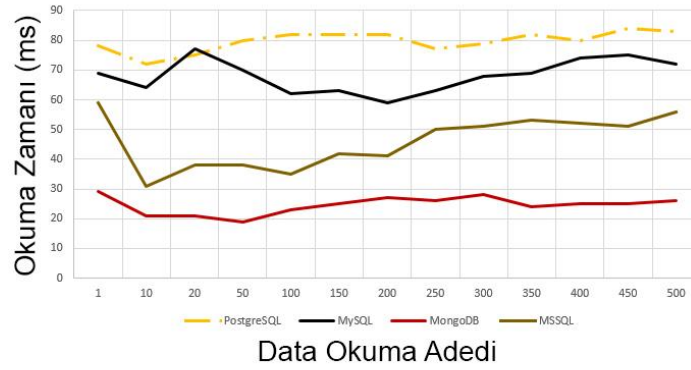
Şekil 8. Birden fazla hastaya ait sürekli verilerin aynı anda yazılması (Simultaneous writing of data from more than one patient)

Sürekli verilerin aynı anda yazılma isteğinde MongoDB test edilen diğer veritabanı sistemlerine göre daha hızlı cevap vermiştir. Bu durum MongoDB veritabanı sisteminin birden fazla kullanıcısı olan ve yazma işlemlerinin sürekli olduğu uygulamalarda daha hızlı sonuçlar verdiğini göstermektedir. MongoDB mIoT uygulaması üzerine aynı anda gelen birden fazla hastaya ait verilerin yazılması işlemlerini 16-55 ms arasında yapmaktadır. Diğer veritabanı sistemlerinin bu senaryo altında yazma süreleri karşılaştırıldığında MongoDB

veritabanının diğerlerine göre üstünlük sağladığı görülmektedir.

3.1.4. Birden fazla hastaya ait verilerin aynı anda okunması (Simultaneous reading of data of more than one patient)

Bu test aşamasında birden fazla hastaya ait medikal verilerin birden fazla kullanıcı tarafından okunması istenmektedir. Oluşturulan bu senaryoda veri tabanlarının okuma performansı test edilmiş ve Şekil 9’daki grafik elde edilmiştir.



Şekil 9. Birden fazla hastaya ait verilerin aynı anda okunması (Simultaneous reading of data of more than one patient)

mIoT uygulamasından birden fazla hastanın verilerini isteyen birden fazla kullanıcı olduğu düşünülmektedir. Bu durumda MongoDB test edilen diğer veri tabanlarına göre üstünlük göstermektedir. MongoDB birden fazla hastaya ait verilerin aynı anda okunması isteğini 18-30 ms arasında cevaplamaktadır.

3.2. Veri Hazırlama (Preparing Data)

Veri hazırlama tabloların tanımı, birincil anahtarlar ve yabancı anahtarlar, tablolar arasındaki ilişkilerin oluşturulması ve veri normalleştirilmesi gibi faaliyetleri içermektedir. Bu süreçler bir ilişkisel veritabanı için gereklidir. Fakat NoSQL veri tabanları şema içermeyen bir veritabanı modelidir ve satır verileri, bunlara uymaya gerek kalmadan doğrudan veri tabanlarına aktarılır. Bu nedenle NoSQL veri tabanları geleneksel veri tabanlarından daha avantajlıdır [4]. NoSQL veri tabanlarında uygulama geliştirme zamanını önemli ölçüde azaltılmıştır.

3.3. Esneklik (Flexibility)

Biçim tanımları, bir medikal sistemi içinde sıklıkla değiştirilir. Sistem önceki bölümlerde açıklandığı gibi verileri yeni formatlarda depolayabilmelidir. Geleneksel veri tabanları statik bir nitelik taşımakta ve başlangıçta başlangıç biçimlerini tanımlamayı gerektirmektedir. Veri modelleme burada izin verilen sayıda sütunla sınırlıdır. Dolayısıyla, formların yeniden tanımlanması ilişkisel veritabanı modelinde bir zorluktur. Buna karşılık, doküman tabanlı veri tabanları, şema gerektirmeden esnek bir yapıya sahiptir. İçerik değiştiğinde, şema yeniden tasarlanmadan veriler eklenebilir.

3.4 Ölçeklenebilirlik (Scalability)

Medikal hizmetlerdeki verilerin sürekli büyümesinden dolayı, medikal uygulamalarda genişletilebilir modeller kullanmak gerekir. İlişkisel veritabanı büyük miktarda veri için planlanmamıştır. Ayrıca, günlük bir ortamda çalışması zordur. Bu nedenle, ölçeklenebilirlik perspektifinden, ilişkisel veri tabanları medikal uygulamalar için doğru model değildir. Buna karşılık,

NoSQL veri tabanları dağıtılmış şekilde büyük miktarda veri için potansiyel olarak hazırlanmıştır. Veriler, birkaç coğrafi bölgedeki farklı makinelerle doğrudan yayılabilir. NoSQL veri tabanları bir bulut ortamında ölçeklenebilirliği sağlayan önemli bileşenlerden biridir.

3.5. Güvenlik (Security)

Büyük boyutlara ulaşan medikal verilerin, farklı veritabanlarında parçalanarak saklanması işleminde ağ güvenliği önemlidir. Veritabanı ağ katmanında ilişkisel veritabanı modellerinin çoğu Transfer Katmanı Güvenliği (TLS: Transport Layer Security) protokolünü desteklemektedir. NoSQL kavramı ilk ortaya çıktığında güvenlik gereksinimleri çoğu protokolü desteklememiştir. Fakat günümüzdeki mevcut NoSQL veritabanı sürümleri TLS ve Anahtar Yönetimi Birlikte Çalışabilirlik Protokolü (KMIP: Key Management Interoperability Protocol) protokollerini desteklemektedir. Güvenli kimlik denetimi için Kerberos büyük istemci/sunucu kimlik doğrulama endüstri standardını kullanmaktadır. Ayrıca Sanal Özel Ağlar (VPN: Virtual Private Networks) kullanımı ile iki ağın şifreli veya sınırlı erişimli bir ağ modeli üzerinden veritabanına bağlanmasını izin vermektedir.

NoSQL veritabanı modelleri, ilişkisel veritabanı modellerinin sağladığı birçok güvenlik alt yapısını bünyesinde barındırmaktadır. Fakat her bir güvenlik yapılandırması ayrı bir uzmanlık alanı gerektirmektedir. Genellikle NoSQL kullanıcıları, performans avantajları için IPSEC protokolleri yerine SSL'yi kullanmayı tercih etmektedirler. Verilerin şifreli saklanması veya paylaşılması için ise gelişmiş sürümlerinde yer alan hazır şifreleme modülleri kullanılmaktadır.

Doküman tabanlı model kullanan veritabanı sistemlerinde ise verilerinin şifrelenmesinin birden fazla yolu vardır. Şifreleme uygulama düzeyinde veya harici dosya sistemi düzeyinde disk şifreleme yöntemi ile şifrelenebilir. Fakat bu yaklaşımlar mevcut modele maliyet, performans yükü ve operasyonel karmaşıklık katacaktır.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT and DISCUSSION)

Bu çalışmada, mIoT verilerinin yönetimiyle ilgili mevcut zorluklar göz önüne alınarak, doküman tabanlı veritabanı yönetimi ve bulut bilişim'e dayanan bir model sunulmuştur. Bu modelin ilişkisel modellere kıyasla performansını değerlendirmek için bir mIoT uygulaması geliştirilmiştir. Sorgu zamanı ele alındığında, doküman tabanlı NoSQL veritabanı modeli, test edilen diğer veritabanı modellerine göre yazma/okuma işleminde hızlı davranmıştır.

Veri hazırlığı göz önüne alındığında, yeni model hazırlık gerektirmeden yarı yapılandırılmış veya yapılandırılmamış verileri saklama kapasitesine sahip olarak işlem gerçekleştirmiştir. Medikal veriler için ilişkisel veri tabanlarında çok fazla alan ve tablo oluşturmak gerekir. Yeni modelin eski modele göre daha fazla esnekliği bulunmaktadır. Yeni modelin ölçeklenebilirliği yükseken, eski modelin bu konuda bazı sınırlamaları vardır.

Mevcut çalışma, mIoT uygulamalarında medikal verilerinin depolanması ve işlenmesi için etkin bir çözüm sağlamıştır. Farklı bağlamlarda yapılan kapsamlı değerlendirmeler, çözümün etkililiğini göstermiştir. Bu modelde, kullanıcıların veri güvenliğine ve gizliliğine güvenmesi önemli bir konudur. Mevcut NoSQL sürümlerinde sağlanan güvenlik alt yapıları yeterli güvenliğin sağlanmasında önemli rol oynamaktadır. Fakat güvenlik seviyesi artırıldığında yaşanan performans kaybı göz ardı edilmeyecek derecededir. Bu nedenle güvenlik/performans konusu ele alınarak bulut ortamında çeşitli güvenlik yaklaşımları araştırılmalı ve mIoT uygulamaları için performansı ve güvenliği yüksek yeni modeller önerilmelidir.

Gelecek çalışmalarda medikal alanda sıklıkla kullanılan veri yapıları ve modellerinin belirlenmesi için çalışmalar yapılacaktır. Bu işlem için saha araştırması gerçekleştirilecektir. Saha araştırması sonucunda belirlenen veri yapıları tez kapsamında belirtilen test senaryolarına uygulanacak ve sonuçlar değerlendirilecektir. Sadece yazı veya numara değerleri alabilen veri yapıları değil aynı zamanda resim, video ve ses gibi farklı veri yapıları ile veritabanı modelleri test edilecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Evans P. and Annunziata M., "Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines", *Research Report*, (2012).
- [2] Khan S. F., "Health care monitoring system in Internet of Things (IoT) by using RFID", *2017 6th Int. Conf. Ind. Technol. Manag*, Cambridge, 198–204, (2017).
- [3] Almotiri S. H., Khan M. A. and Alghamdi M. A., "Mobile health (m-Health) system in the context of IoT", *2016 4th Int. Conf. Futur. Internet Things Cloud Work. W-FiCloud*, Vienne, 39–42, (2016).
- [4] Goli-Malekabadi Z., Sargolzaei-Javan M. and Akbari M. K., "An effective model for store and retrieve big health

- data in cloud computing", *Comput. Methods Programs Biomed*, 132, 75–82, (2016).
- [5] Kang Y., Park I., Rhee J. and Lee Y., "MongoDB-based Repository Design for IoT-generated RFID / Sensor Big Data", *IEEE Sens. J.*, 16(2): 485–497, (2016).
- [6] Archip A., Botezatu N., SSerban E., Herghelegiu P. C. and Zal A., "An IoT based system for remote patient monitoring", *17th Int. Carpathian Control Conf. ICCCC*, Tatra, 1–6, (2016).
- [7] Cruz J., Brooks D. and Marques A., "Home telemonitoring in COPD: A systematic review of methodologies and patients' adherence", *Int. J. Med. Inform.*, 83(4): 249–263, (2014).
- [8] Pollonini L., Rajan N. O., Xu S., Madala S. and Dacso C. C., "A novel handheld device for use in remote patient monitoring of heart failure patients-design and preliminary validation on healthy subjects", *J. Med. Syst.*, 36(2): 653–659, (2012).
- [9] Msayib Y., Gaydecki P., Callaghan M., Dale N. and Ismail S., "An Intelligent Remote Monitoring System for Total Knee Arthroplasty Patients", *J. Med. Syst.*, 41(6): 1–6, (2017).
- [10] Sotiriou D., "Health Care in Remote Areas", *Journal of Medical Systems*, 1: 69–76, (1995).
- [11] Kumari S., Bansal A., Tiwari V. N., Nayak M. M. and Narayanan R., "Remote health monitoring system for detecting cardiac disorders", *IEEE Int. Conf. Bioinforma. Biomed. IEEE BIBM*, Belfast, 30–34, (2014).
- [12] Harbawi M. A., Ibrahim M. I. and Motakabber S. M. A., "Photoplethysmography based remote health monitoring system", *IEEE Int. Conf. Smart Instrumentation, Meas. Appl. ICSIMA*, Kuala Lumpur, 26–27, (2013).
- [13] Jameson R., Lorence D. and Lin J., "Data capture of transdermal glucose monitoring through computerized appliance-based virtual remote sensing and alert systems", *J. Med. Syst.*, 36(4): 2193–2201, (2012).
- [14] Babu S., Chandini M., Lavanya P., Ganapathy K. and Vaidehi V., "Cloud-enabled remote health monitoring system", *Recent Trends Inf. Technol. (ICRTIT)*, Chennai, 702–707, 2013.
- [15] Kirtana R. N. and Lokeswari Y. V., "An IoT based remote HRV monitoring system for hypertensive patients", *Comput. Commun. Signal Process. Spec. Focus IoT, ICCSP*, Tamilnadu, (2017).
- [16] Al-Adhab A., Altmimi H., Alhawashi M., Alabduljabbar H., Harrathi F. and AlMubarek H., "IoT for remote elderly patient care based on Fuzzy logic", *Networks, Comput. Commun.*, Hawaii, 1–5, (2016).
- [17] Raghupathi W. and Raghupathi V., "Big data analytics in healthcare: promise and potential", *Heal. Inf. Sci. Syst.*, 2(1): 3, (2014).
- [18] Xiaomin K., Fan B., Nie W. and Yi D., "Design on mobile health service system based on Android platform", *IEEE Adv. Inf. Manag. Commun. Electron. Autom. Control Conf. IMCEC*, Xi'an, 1683–1687, (2017).
- [19] Degada A. and Savani V., "Design and implementation of low cost, portable telemedicine system: An embedded technology and ICT approach", *NUiCONE 2015 - 5th Nirma Univ. Int. Conf. Eng.*, Ahmedabad, (2016).
- [20] Sharwardy S. N., Rahman Z., Parveen S., Sarwar H. and Hossain A. M., "A cost-effective web-based teleconsultation system", *8th Int. Conf. Inf. Technol. Asia - Smart Devices Trend Technol. Futur. Lifestyle, Proc. CITA*, Xi'an, 2–5, (2013).

- [21] Hu P., Ning H., Qiu T., Xu Y., Luo X. and Sangaiah A. K., "A unified face identification and resolution scheme using cloud computing in Internet of Things", *Futur. Gener. Comput. Syst.*, 81(1): 582–592, (2018).
- [22] Maurya A. and Bade D. S., "Design of a wireless health monitoring system based on M2M communication", *Int. Conf. Control. Instrumentation, Commun. Comput. Technol. ICCICCT*, Kanyakumari, 949–953, (2014).
- [23] Pambudi I. T., Hayasaka T., Tsubota K., Wada S. and Yamaguchi T., "Sustainable patient information network (SPaIN) for primary care health center in Indonesia", *25th Annu. Int. Conf. Ieee Eng. Med. Biol. Soc. Vols 1-4 A New Begin. Hum. Heal.*, 25(1): 1421–1424, (2003).
- [24] Sanborn M., "Director's Forum - Developing a Pharmacy Information System Infrastructure", *Hosp. Pharm.*, 42(5), 470–473, (2007).
- [25] Hussain A., Wenbi R., Da Silva A. L., Nadher M. and Mudhish M., "Health and emergency-care platform for the elderly and disabled people in the Smart City", *J. Syst. Softw.*, 110: 253–263, (2015).
- [26] Talamino-Barroso A., Estudillo-Valderrama M. A., Roa L. M., Reina-Tosina J. and Ortega-Ruiz F., "A Machine-to-Machine protocol benchmark for eHealth applications - Use case: Respiratory rehabilitation", *Comput. Methods Programs Biomed.*, 129: 1–11, (2016).
- [27] Paethong P., Sato M. and Namiki M., "Low-power distributed NoSQL database for IoT middleware", *5th ICT Int. Student Proj. Conf. ICT-ISPC*, Nakhon Pathom, 158–161, (2016).
- [28] Poulter A. J., Johnston S. J. and Cox S. J., "Using the MEAN stack to implement a RESTful service for an Internet of Things application", *IEEE World Forum Internet Things*, Milan, 280–285, (2015).
- [29] Farahani B., Firouzi F., Chang V., Badaroglu M., Constant N. and Mankodiya K., "Towards fog-driven IoT eHealth: Promises and challenges of IoT in medicine and healthcare", *Futur. Gener. Comput. Syst.*, 78: 659–676, (2018).
- [30] Nkenyereye L. and Jang J. W., "Performance Evaluation of Server-side JavaScript for Healthcare Hub Server in Remote Healthcare Monitoring System", *Procedia Comput. Sci.*, 58(1): 382–387, (2016).
- [31] Van Der Veen J. S., Van Der Waaij B. and Meijer R. J., "Sensor Data Storage Performance: SQL or NoSQL, Physical or Virtual", *IEEE Fifth Int. Conf. Cloud Comput.*, Nice, 431–438, (2012).
- [32] Wei-Ping Z., Ming-Xin L. and Huan C., "Using MongoDB to implement textbook management system instead of MySQL", *IEEE 3rd Int. Conf. Commun. Softw. Networks, ICCSN*, Xi'an, 303–305, (2011).
- [33] Gyorodi C., Gyorodi R., Pecherle G. and Olah A., "A comparative study: MongoDB vs. MySQL", *13th Int. Conf. Eng. Mod. Electr. Syst. EMES*, Oradea, 0–5, (2015).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Hareketli hedefli - heterojen filolu İHA rotalama problemi için yeni bir çözüm yaklaşımı

A new solution approach for UAV routing problem with moving target - heterogeneous fleet

Yazar(lar) (Author(s)): Ukbe Üsame UÇAR¹, Selçuk Kürşat İŞLEYEN²

ORCID¹: 0000-0001-7610-6547

ORCID²: 0000-0003-2387-7799

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Uçar U. Ü., İşleyen S. K., "Hareketli hedefli - heterojen filolu İHA rotalama problemi için yeni bir çözüm yaklaşımı", *Politeknik Dergisi*, 22(4): 999-1016, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.466393

Hareketli Hedefli - Heterojen Filolu İHA Rotalama Problemi İçin Yeni Bir Çözüm Yaklaşımı

Araştırma Makalesi / Research Article

Ukbe Üsame UÇAR^{1*}, Selçuk Kürşat İŞLEYEN²

¹Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 01.10.2018 ; Kabul/Accepted : 27.01.2019)

ÖZ

Savunma sanayinde yaşanan teknolojik gelişmeler, ülkeleri robotik sistemlere dayalı asksiz ordular oluşturmaya yönlendirmektedir. Hedeflerin anlık olarak gözetlenmesi, takibi, tespiti ve imhasında, insansız hava araçlarının yoğun bir şekilde kullanılmasıyla beraber, operasyon alanında farklı özelliklere sahip hava araçlarından hangilerinin seçileceği ve etkin bir şekilde nasıl rotalanacağı, önemli ve zor bir problem olarak ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmada filo halinde hareket eden silahlı ve silahsız insansız hava araçlarının kapasite ve zaman penceresi kısıtları dikkate alınarak hareket halindeki hedefleri etkisiz hale getirmesi için sezgisel algoritmaya dayalı çok kriterli bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Hedef ve vurucuların önceliklendirilmesinde Analitik Hiyerarşik Proses yönteminden yararlanılmış, İHA' lara ait uçuşların belirli bir maliyete sahip olması, gereksiz kullanılan İHA' ların bakım-onarım maliyetini ve arıza riskini artırması, operasyon alanında fazla sayıda İHA kullanılmasının düşman unsurlarını uyandırması ve İHA' lara karşı savunma tedbirleri almaya yönlendirmesi nedenlerinden dolayı kısa bir çözüm süresi içinde tüm hedeflerin minimum sayıda araç ile imha edilmesi amaçlanmıştır. Algoritmanın etkinliği, vurucu sayısının 10 ile 50, hedef sayısının 40 ile 200 arasında değiştiği 25 farklı senaryo üzerinde test edilmiş, sonuç olarak kabul edilebilir çözüm süresi içerisinde tüm hedeflerin belirtilen öncelik sırasına göre minimum sayıda araçla imha edildiği tespit edilmiştir. Önerilen yöntemin filo halinde hareket eden farklı özelliklere sahip (heterojen) insansız hava araçlarının etkin bir şekilde rotalanmasına katkıda bulunduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Dinamik insansız hava aracı rotalama, analitik hiyerarşik proses, sezgisel algoritma, hareketli hedefli gezgin satıcı problemi, filo rotalama.

A New Solution Approach for UAV Routing Problem with Moving Target – Heterogeneous Fleet

ABSTRACT

The technological developments in the defence industry lead countries to create unmanned armies based on robotic systems. Due to the intense use of unmanned aerial vehicles in the instant surveillance, tracking, detection and disposal of targets, it is an important and difficult problem to determine which of the different types of air vehicles in the field of operations should be selected and how they can be effectively routed. In this study, a multi-criteria solution approach based on heuristic algorithm is proposed for destroying moving targets taking into account of the capacity and time window constraints by armed and unarmed unmanned aerial vehicles moving as a fleet. The Analytical Hierarchical Process method was used to prioritize the targets and pursuers; and it was aimed to destroy all targets with a minimum number of vehicles in a short time due to the cost of flights with UAVs, increase in maintenance-repair costs and the risk of fault due to unnecessary UAV use, the use of large numbers of UAVs in the field of operation evoked enemy elements and directed them to take defensive measures against UAVs. The effectiveness of the algorithm has been tested on 25 different scenarios where the number of pursuers is between 10 and 50 and the target number ranges from 40 to 200. As a result, it has been determined that all targets are destroyed with minimum number of vehicles according to the specified order of priority within the acceptable solution period and the proposed method contributed to the efficient routing of (heterogeneous) unmanned aerial vehicles moving in a fleet.

Keywords: Dynamic unmanned aerial vehicle routing problem, analytical hierarchical process, heuristic algorithm, moving target traveling salesman problem, fleet routing.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya'da İnsansız hava araçları oldukça eski bir tarihsel geçmişe sahip olmaktadır. Avusturyalılar' ın 22 Ağustos 1849 yılında Venedik (İtalya) üzerine yaptıkları hava saldırısında 200 pilotsuz balonu kullanması, literatürde ilk İHA kullanımı olarak kabul görmektedir [1]. Bugünkü bilinen anlamıyla ilk İHA denemeleri 1916 yılında Elmer

Sperry tarafından uçağın, uçuş kontrolü için kullanılan bir elektronik cihaz kullanılarak uçurmasıyla başlamıştır. İlk otonom İHA Charles Kettering tarafından, radyo kontrol mekanizması ile uzaktan yönlendirilebilen ilk İHA 1920 yılında Lawrence Sperry tarafından geliştirilmiştir. İkinci Dünya Savaşı' ndan sonra ise keşif ve gözetleme görevinde kullanılan İHA' lar ile ilgili çalışmalara yoğunlaşmıştır [2]. 1980'li yıllardan itibaren İHA' lar küçülmeye ve çok fonksiyonlu bir hale

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : uuucar@firat.edu.tr

gelmeye başlamış, keşif ve gözetleme operasyonlarında kullanılan bu araçlar silahlandırılarak hedeflerin etkisiz hale getirilmesi görevlerinde etkili bir şekilde kullanılmıştır [3].

Günümüz dünyasında İHA' lar gerek askeri gerekse sivil amaçlı olmak üzere birçok alanda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Askeri operasyonlar, arama-kurtarma faaliyetleri, tarımsal uygulamalar, meteorolojik faaliyetler, yangın, sel gibi doğal felaketlerin tespiti ve takibi bu alanlardan bazılarıdır. Literatürde insansız hava araçları teknik özelliklerine ve kullanım amaçlarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. İnsansız hava aracının kullanım amacı, faydalı yük taşıma ve uçuş kapasitesi, büyüklüğü, irtifası ya da menzili, faydalı yük tipi, kalkışta-inişte kullandığı metodoloji ve kontrol biçimi bu sınıflandırma şekillerinden bazılarıdır [4].

Uluslararası literatürde kabul gören iki adet sınıflandırma şekli bulunmaktadır. Bu sınıflandırma şekillerinden birincisi NATO ya (North Atlantic Treaty Organization-Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü) ikincisi ise EUROUVS e (The European Association of Unmanned Vehicles Systems - Avrupa İnsansız Araç Sistemleri Birliği) ait olmaktadır. NATO' ya göre İHA için yapılan sınıflandırma çizelge 1' de, EUROUVS e göre yapılan sınıflandırma çizelge 2' de gösterilmektedir [5], [6], [7]. Bu sınıflandırmalara ek olarak kullanım amaçlarına göre İHA' lar çizelge 3' deki gibi sınıflandırılmaktadır [8].

Çizelge 1. NATO ya göre İHA sınıflandırması (NATO UAS Classification)

| Sınıf | Kategori | Normal Görevi | Normal Görev İrtifası | Normal Görev Çapı | Örnek Platform |
|-------------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|
| Class III (> 600 kg) | Vurucu/Savaşçı | Stratejik/Ulusal | 65,000 ft e kadar | Sınırlanmamış (BLOS) | Reaper |
| | HALE | Stratejik/Ulusal | 65,000 ft e kadar | Sınırlanmamış (BLOS) | Global Hawk |
| | MALE | Operasyonel/Saha | 45,000 ft e kadar (MSL) | Sınırlanmamış (BLOS) | Heron |
| Class II (150 kg – 600 kg) | Taktik | Taktiksel Düzenleme | 18,000 ft e kadar (AGL) | 200 km (LOS) | Hermes 450 |
| | Küçük (> 15 kg) | Taktiksel Birim/Birlik | 5,000 ft e kadar (AGL) | 50 km (LOS) | Scan Eagle |
| Class I (< 150 kg) | Mini (< 15 kg) | Taktiksel Alt-Birim | 3,000 ft e kadar (AGL) | 25 km e kadar (LOS) | Skylark |

Çizelge 2. EUROUVS ye göre İHA sınıflandırması (EUROUVS UAS Classification)

| İHA Sınıfı | Kategori | Maksimum Kalkış Ağırlığı (kg) | Maksimum Uçuş Yüksekliği (m) | Dayanıklılık (saat) | Data Link Aralığı (km) |
|-----------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------|
| Mikro/Mini İHA | Mikro/Mini | 0.1 | 250 | 1 | <10 |
| | Mini | <30 | 150-300 | <2 | <10 |
| Taktiksel İHA | Close Range (CR) | 150 | 3000 | 2-4 | 10-30 |
| | Short Range (SR) | 200 | 3000 | 3-6 | 30-70 |
| | Medium Range (MR) | 150-500 | 3000-5000 | 6-10 | 70-200 |
| | Long Range (LR) | - | 5000 | 6-13 | 200-500 |
| | Endurance (EN) | 500-1500 | 5000-8000 | 12-24 | >500 |
| | Medium Altitude, Long Endurance (MALE) | 1000-1500 | 5000-8000 | 24-48 | >500 |
| Stratejik İHA | High Altitude, Long Endurance (HALE) | 2500-12500 | 15000-20000 | 24-48 | >2000 |
| Özel Görev için Kullanılan İHA | Lethal (LET) | 250 | 3000-4000 | 3-4 | 300 |
| | Decoys (DEC) | 250 | 50-5000 | <4 | 0-500 |
| | Stratospheric (STRATO) | - | 20000-30000 | >48 | >2000 |
| | Exo-stratospheric (EXO) | - | >30000 | - | - |

Çizelge 3. Kullanım amaçlarına göre İHA'lar (UAVs according to their usage purposes)

| Görev Adı | Kullanım Amacı |
|-------------------------|--|
| Hedef ve yem | Düşman kuvvetlerinin hava araçlarına karşı bir yem ya da tuzak olarak kullanılarak bu kuvvetlere ait lokasyonların belirlenmesine yardımcı olan araçlar. |
| Keşif ve gözetleme | Düşman kuvvetlerine ait cephane, silah ya da askeri konumlar gibi cephe bilgilerinin toplanmasında kullanılan araçlar. |
| Çatışma | Düşman ya da terör unsurlarının etkisiz hale getirilmesinde kullanılan mühimmat yüklü araçlar. |
| Lojistik | Taşımacılık faaliyetlerinde kullanılan araçlar. |
| Araştırma ve geliştirme | Gelecek yıllardaki uygulamalar için Ar-ge çalışmalarında kullanılan araçlar. |
| Sivil ve ticari | Satış ve pazarlama faaliyetlerinde sivil insanlar için ticaret amacıyla kullanılan araçlar. |

Bu çalışmada keşif ve gözetleme ile çatışma görevlerinde kullanılan insansız hava araçlarının filo halinde eş zamanlı olarak rotalanması problemi ele alınmakta ve kısa sürede etkin çözümler üretilmesi amaçlanmaktadır. Problem literatürde hareket eden nesnelerin yakalanması problemi olarak da bilinen Hareketli Hedefli Gezgin Satıcı Problemi (HHGSP) (Moving Target Traveling Salesman Problem) başlığı altında incelenmektedir.

HHGSP, ilk kez Helvig ve ark., tarafından 1998 yılında ortaya atılmış ve belirtilen tarihten itibaren askeri operasyonlar başta olmak üzere birçok alanda etkin bir şekilde uygulanmıştır [9]. HHGSP’de, $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ hedefler kümesini oluşturmakta, her bir s_i hedefi, sabit bir v_i hızına ve p_i başlangıç pozisyonuna sahip olmaktadır. Sistemde başlangıç noktasından (orijin) harekete başlayan bir adet vurucu bulunmakta ve vurucu ($v > |v_i|$) tüm hedeflerden daha fazla hıza sahip olmaktadır. Problemden vurucunun orijinden başlayıp, tüm hedefleri imha edip tekrar orijine döneceği minimum tur rotasının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

HHGSP ile ilgili literatürde yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Helvig ve ark., problemi vurucunun x koordinat düzleminde hareket etmesi, yeniden ikmal yapması ve birden çok vurucunun bulunması durumları açısından ele almış, bu durumlara ilişkin çözüm metodolojileri önermişlerdir [9]. Fügenschuh ve ark., çok vuruculu, çok hedefli HHGSP için tam sayılı matematiksel model geliştirmiş ve model içerisinde zaman kavramını kesikli olarak belirlemişlerdir [10]. Stieber ve ark., çok hedefli çok silahlı atama problemini çözmek için zamanın kesikli olarak kabul edildiği bir matematiksel model geliştirmişler ve çalışma içerisinde enerji tüketimini bir amaç olarak dikkate almışlardır [11]. Stieber ve Fügenschuh, hedeflerin belirli bir zaman penceresine sahip olduğunu varsayımlar ve tüm hedeflerin imha edildiği minimum seyahat turunu, zamanın kesikli ve sürekli olarak ele alındığı iki farklı modelleme yaklaşımıyla belirlemeye çalışmışlardır [12]. Jiang ve ark., tek vuruculu, çok hedefli HHGSP’yi çözmek için genetik algoritmaya dayalı bir çözüm yaklaşımı önermişler ve algoritmanın etkinliğini artırmak için farklı çaprazlama ve mutasyon operatörleri ile bakım onarım mekanizmalarını kullanmışlardır [13]. Jindal ve ark., vurucunun iki hedefi imha ettikten sonra orijin noktasına dönmesi gerektiği varsayımı altında bir vuruculu

“n” hedefli HHGSP’yi çözmek için hedeflerin önceliklendirilmesine dayalı sezgisel bir algoritma geliştirmişler ve toplam seyahat zamanını minimize etmeyi amaçlamışlardır [14]. Englot ve ark., insansız hava aracı ile birden fazla hedefin imha edilmesi problemini ele almış, problemin çözümü için iki farklı sezgisel algoritma önermişlerdir. Analiz çalışması sonucunda hızlı hareket eden sistemlerde açgözlü olmayan sezgisellerin, yavaş hareket eden sistemlerde ise ajan tabanlı Lin-Kernighan Sezgiselinin(LKH) daha iyi çözümler ürettiğini belirtmişlerdir [15]. Jindal ve ark., yeniden ikmal yapılan HHGSP’yi, hedeflerin orijine yaklaştığı ve orijinden uzaklaştığı durumlar açısından değerlendirmiş ve problemin çözümü için iki farklı algoritma geliştirmişlerdir [16].

Khosravi ve ark., görev alanında çeşitli engellerin bulunduğu ve hedeflere ait yörüngelerin belirli olmadığı ödül toplama problemini incelemiş ve problemin çözümü için sezgisel bir algoritma geliştirmişlerdir [17]. Zhou ve ark., şehir lokasyonlarının Gauss dağılımına göre zaman içerisinde değiştiği Dinamik GSP’yi çözmek için “Dynamic Inver-Over Evolutionary” algoritmasını geliştirmiş ve analiz çalışmaları sonucunda önerilen algoritmanın optimal sonuçlara ulaştığını belirtmişlerdir [18]. Choubey, belirli açı ve hızlarda hareket eden hedeflerin, orijinden başlayan bir vurucu tarafından imha edilmesi problemini ele almış ve problemin çözümü için genetik algoritmaya dayalı bir çözüm yaklaşımı önermiştir [19]. Lee ve ark., silah-hedef atama problemini çözmek için Bağışıklık Sistemine Dayalı Karınca Kolonisi Optimizasyonu yöntemini kullanmış ve beklenen tahribatın minimize edilmesini amaçlamışlardır [20]. Pushkarini ve Bullo, çalışmalarında hedeflerin birim çember üzerinde Poisson dağılımına göre rastgele dağıldığını varsayımlar ve problemin çözümü için üç farklı sezgisel algoritma önermişlerdir [21]. Knapp ve Rothe, top atışı ya da roket gibi dışarıdan yapılan saldırıların lazer silahları ile etkisiz hale getirildiği silah hedef atama problemini ele almış ve problemin çözümünde simülasyon metoduna dayalı bir çözüm metodolojisi geliştirmişlerdir [22]. Ries ve Ishizaka, çalışmasında belirsizliğin ve dinamikliğin yüksek olduğu deniz gözetleme faaliyetlerinde kullanılacak insansız hava araçlarının rotalanması problemini incelemiş, belirtilen problemi çözmek için çok kriterli karar

verme ve matematiksel modellemeye dayalı hibrit bir çözüm yaklaşımı önermişlerdir [23]. Bu çalışmalara ek olarak, HHGSP kapsamında literatürde yapılmış çalışmalar çizelge 4’ de gösterilmektedir.

çözülmede, ele alınan problem ve problem için önerilen sezgisel algoritma, HHGSP ve İHA Rotalama Problemi literatüründe bilindiği kadarıyla ilk kez kullanılmaktadır. Ayrıca bu çalışma, hareketli hedeflerin bulunduğu bir sis-

Çizelge 4. HHGSP ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalardan bazıları (Some of the studies in the literature about MTTSP)

| Yazar Adı ve Soyadı | Kaynak | Yılı | Çözüm Yöntemi |
|----------------------|--------|------|---|
| Bourjolly ve ark. | [24] | 2006 | Tabu Arama Alg. ve Sezgisel Alg. |
| Blough ve ark. | [25] | 2016 | Genetik Algoritma ve Sıralı Buluşma Noktası Metodu |
| Mei ve ark. | [26] | 2015 | Sezgisel Algoritma |
| Groba ve ark. | [27] | 2015 | Genetik Algoritma, En Yakın Komşu Arama Algoritması |
| Mercer ve ark. | [28] | 2008 | Genetik Algoritma |
| Killby ve ark. | [29] | 2007 | Genetik Algoritma |
| Marlov ve ark. | [30] | 2007 | Sezgisel Algoritma |
| Fang ve ark. | [31] | 2013 | CASS Algoritması |
| Cross ve ark. | [32] | 2007 | Sezgisel Algoritma |
| Shuttleworth ve ark. | [33] | 2008 | Matematiksel Modelleme ve Sezgisel Algoritmalar |
| Bimbo ve Pernici | [34] | 2005 | Optimal Çözüm Metodolojisi |
| Bimbo ve Pernici | [35] | 2005 | Monte Carlo Simülasyonu |
| Ilavarasi ve Joseph | [36] | 2014 | Literatür Araştırması |
| Asahiro ve ark. | [37] | 2004 | Sezgisel Algoritma |
| Asahiro ve ark. | [38] | 2008 | 2 faktörlü yaklaşım algoritması |
| Chalasanı ve ark. | [39] | 1996 | Yaklaşım Algoritması |
| Papadakos ve ark. | [40] | 2011 | Sezgisel Algoritma |
| Hammar ve Nilsson, | [41] | 1999 | Sezgisel Algoritma |
| Bengt | [42] | 2002 | Sezgisel Algoritma |

Bu çalışmada, çok vuruculu-çok hedefli, zaman pencereli ve kapasite kısıtlı HHGSP ele alınmıştır. Problemin çözümü için çok kriterli karar verme metodolojisine dayalı sezgisel bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. İncelenen problemde farklı amaç ve teknik özelliklere sahip hedefler ve vurucular bulunmakta, hedefler sistemde sabit kalmayıp hareket etmekte ve sistemden ayrılış zamanları farklı olmaktadır. Operasyon anında vurucular arasından ideal olanlarının sadece göreve çıkarılması ve doğru vurucunun doğru hedeflere araç-uçuş zaman kapasitesi dikkate alınarak hızlı bir şekilde yönlendirilmesi istenmektedir. Tüm bu kısıtlamalar ve amaçlar altında heterojen İHA ve SİHA filosunun minimum sayıda araç kullanarak maksimum başarı ile tüm hedefleri imha etmesi ve ilgili operasyonu gerçekleştirmesi ancak akıllı bir çözüm mekanizmasının kullanılması ile mümkün olacaktır. Problem içerisinde hedefler anlık olarak sürekli konum değiştirmekte, sistemdeki hedef sayısı zaman içerisinde değişebilmekte, her bir birim zamanda vuruculara ve hedeflere ilişkin koordinatların yeniden belirlenmesi gerekmektedir. Operasyon esnasında hedeflerin doğru bir şekilde tasnif edilmesi icap etmekte (hedef için Silahlı İHA mı yoksa Silahsız İHA mı kullanılacağına belirlenmesi): bu dinamik bilgileri altında hangi hedefin hangi vurucu tarafından kaçınıcı birim zamanda hangi koordinat ekseninde vurulacağına yeniden hesaplanması ve vurucuya ait uçuş kapasite bilgisinin sürekli güncellenmesi zorunlu olmaktadır. Bu gereksinimler altında, sistemdeki hedef-vurucu vurma sırasına ait çok büyük miktardaki olası çözüm arasından minimum sayıda aracın kullanıldığı görev rotasının kısa bir çözüm süresi içerisinde belirlenmesi, problemin çözümünü oldukça zorlaştırmakta ve problemi dinamik bir yapıya büdündürmektedir. Belirtilen problem, önerilen çözüm mekanizması ile çok kısa bir süre içerisinde etkin bir şekilde

temde İHA ve SİHA filolarının aynı operasyon alanı içerisinde eş zamanlı olarak ve birlikte rotalanması nedeniyle de literatürdeki diğer çalışmalardan ayrılmaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde problemin tanımı yapılmakta, üçüncü bölümünde kullanılan çözüm metodolojisi ifade edilmektedir. Dördüncü bölümde yapılan uygulama çalışmasına ilişkin bilgiler verilmekte, beşinci bölümde çalışmanın sonuçları tartışılmaktadır. Son bölümde ise çalışmaya ilişkin genel değerlendirmeler yapılmakta ve gelecekteki çalışmalara ilişkin öngörülerde bulunulmaktadır.

2. PROBLEMİN TANIMI (PROBLEM DEFINITION)

HHGSP, robotik sistemlerin çizelgelenmesi, insansız hava araçlarının rotalanması, uydular için yakıt ikmal rotasının tespiti, deniz gözetleme operasyonları ve güvenlik kamerasıyla yapılan tarama faaliyetlerinde izlenecek yolun belirlenmesi problemlerinde uygulanmaktadır. Problem, uygulama alanının çeşitliliğinden dolayı içerisinde birçok farklı kısıdı barındırabilmektedir. Bu çalışmada, operasyon alanındaki hedeflerin filo halinde hareket eden insansız hava araçları tarafından zaman penceresi, kapasite ve görev kısıtlamaları dikkate alınarak kabul edilebilir çözüm süresi içerisinde minimum sayıda araç ile imha edilmesi problemi ele alınmaktadır.

Problem, günümüzde birçok ülkenin karşı karşıya kaldığı terör, kaçakçılık ya da mülteci geçişleri gibi ulusal güvenliği tehdit eden unsurların takibi, kontrolü ve etkisiz hale getirilmesi operasyonlarında ortaya çıkmaktadır. Birçok ülke belirtilen görevleri sağlamak için insansız hava araçlarından yararlanmakta, yüksek risk gerektiren operasyonlarda minimum kayıp ve

maksimum başarı ile görevlerini gerçekleştirmek için bu araçları kullanmaktadır. Buna ek olarak, ülkeler bu operasyonları yaparken fazla sayıda araç kullanmanın yaratabileceği olumsuz sonuçlardan etkilenmemek için minimum sayıda İHA ve SİHA kullanmayı amaçlamakta, gereksiz ya da fazla İHA kullanımının oluşturabileceği olumsuz sonuçlar aşağıda belirtilmektedir [43].

- İHA' lara ait uçuş maliyetlerinin fazla olması
- Gereksiz yere yapılan uçuşların İHA' lara ait bakım-onarım maliyetlerini artırması
- Operasyon alanında fazla sayıda İHA' nın görev almasının düşman unsurlarını uyarması ve İHA' lara karşı tedbirler almaya yönlendirmesi
- Fazla sayıda yapılan uçuş nedeniyle arıza riskinde artış yaşanması ve İHA' ların kaybolması vb.de

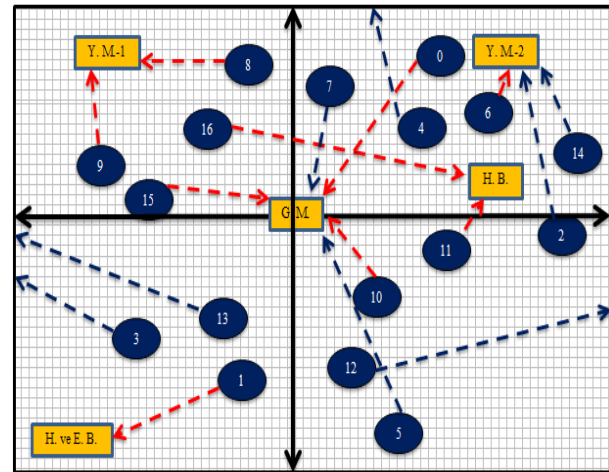
İnsansız hava araçları teknik özelliklerine ve kullanım amaçlarına göre farklı görevlerde kullanılabilir. Silahsız insansız hava araçları (İHA) ile keşif ve gözetleme yapılırken, silahlı insansız hava araçları (SİHA) ile hedefler anlık olarak imha edilebilir. Filo halinde hareket eden insansız hava araçlarının kabul edilebilir çözüm süreleri içerisinde doğru hedeflere etkin bir şekilde rotalanması ise önemli bir problemi ifade etmektedir.

Bu çalışmada heterojen filolu insansız hava araçları tarafından hareketli hedeflerin imha edilmesi problemi ele alınmakta, problemin görsel gösterimi şekil 1'de, koordinat eksenine üzerine yerleşimi şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Probleminde gözetilmesi ve imha edilmesi gereken hedefler (Targets which are needed to be observed and destroyed in the problem)

Şekil 1'de, herhangi bir coğrafi alan üzerinde bulunan sivil, haberleşme ve güvenlik binalarından oluşan bir yerleşim merkezi gösterilmektedir. Burada "Y.M." Yerleşim Merkezini, "H.B." Hükümet Binalarını, "H. ve E. B." Haberleşme ve Enerji Binalarını, "G.M." ise Güvenlik Merkezi binasını ifade etmektedir. Şekil üzerinde yerleşim merkezinde bulunan binalara farklı amaçlar doğrultusunda çeşitli hedeflerden saldırı ya da istihbarat amacıyla tehditler bulunmaktadır. Problemden temel amaç, tüm hedefleri insansız hava araçlarının teknik özellikleri ve kapasite kısıtlarını dikkate alarak kabul edilebilir çözüm zamanı içerisinde imha etmektir. Sistem içerisinde 17 hedef bulunmakta, bunların her biri farklı amaç ve özelliklere sahip olmaktadır. Bu hedefler t=0 anında belirtilen lokasyonlardan harekete başlamakta ve her bir hedefin kendi zaman aralığı içerisinde etkisiz hale getirilmesi gerekmektedir. Problemden Güvenlik Merkezinin bulunduğu bina orijin (0,0) olarak kabul edilmekte, yerleşim merkezi ve hedefler koordinat ekseninin dört farklı bölgesinde bulunabilmektedir. Problemin koordinat eksenindeki görünümü şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Problemin koordinat ekseninde gösterimi (The illustration of the problem on the coordinate axis)

Şekil 2' de mavi düğümler hedefleri, turuncu kutular hedeflerin varış yapacağı noktaları, aradaki oklar ise hedeflerin izleyeceği rotaları göstermektedir. Bu oklardan kırmızı renkli olanlar çatışma görevinde olan hedefleri, mavi oklar ise keşif ve gözetleme görevini gerçekleştiren hedefleri ifade etmektedir. Bu hedeflere ilişkin bilgiler çizelge 5'de belirtilmektedir.

Çizelge 5. Problemden hedeflerin özellikleri (The characteristics of the targets in the problem)

| Hedef No | Araç | Başlangıç konumu(x,y) | Çıkış Zamanı | Hız | Silah durumu | Variş noktası | Variş koordinatı(x,y) | Amaç | Görev |
|----------|--------------|-----------------------|--------------|-----|----------------------|---------------|-----------------------|-----------------|--------------------|
| 0 | SİHA | 310, 407 | 3,65 | 140 | Bomba | G.M. | 0,0 | Bombalama | Çatışma |
| 1 | Mobil Birlik | -10, -386 | 4,18 | 100 | Hafif Tahripli Silah | H. ve E. B. | -420,-470 | İletişimi Kesme | Çatışma |
| 2 | Araba | 430,-15 | 4 | 110 | Yok | Y.M.-2 | 406,424 | İstihbarat | Keşif ve Gözetleme |
| 3 | Araba | -240, -354 | 3,26 | 110 | Orta tahripli silah | Sınır | -496,-102 | Şüpheli araç | Keşif ve Gözetleme |

Çizelge 5. Problemdaki hedeflerin özellikleri (The characteristics of the targets in the problem)

| Hedef No | Araç | Başlangıç konumu(x,y) | Çıkış Zamanı | Hız | Silah durumu | Varış noktası | Varış koordinatı(x,y) | Amaç | Görev |
|----------|--------------|-----------------------|--------------|-----|----------------------|---------------|-----------------------|----------------|--------------------|
| 4 | Araba | 282, 206 | 2,82 | 120 | Yok | Sınır | 114,500 | Şüpheli araç | Keşif ve Gözetleme |
| 5 | İHA | 152, -492 | 3,68 | 140 | Orta tahripli silah | G.M. | 0,0 | İstihbarat | Keşif ve Gözetleme |
| 6 | Mobil Birlik | 390, 227 | 1,98 | 100 | Ağır Tahripli Silah | Y.M.-2 | 406,424 | Saldırı | Çatışma |
| 7 | Tır | 44, 364 | 3,66 | 100 | Yok | G.M. | 0,0 | İstihbarat | Keşif ve Gözetleme |
| 8 | Mobil Birlik | -90, 380 | 2,26 | 100 | Hafif Tahripli Silah | Y.M.-1 | -316,392 | Saldırı | Çatışma |
| 9 | Mobil Birlik | -302, 104 | 2,88 | 100 | Ağır Tahripli Silah | Y.M.-1 | -316,392 | Saldırı | Çatışma |
| 10 | Mobil Birlik | 160, -187 | 2,46 | 100 | Ağır Tahripli Silah | G.M. | 0,0 | Saldırı | Çatışma |
| 11 | Araba | 291, -361 | 0,89 | 120 | Bomba | H.B. | 330,370 | Bombalama | Çatışma |
| 12 | Tır | 116, -361 | 3,5 | 110 | Yok | Sınır | 500,-326 | Şüpheli araç | Keşif ve Gözetleme |
| 13 | Araba | -60, -209 | 3,78 | 120 | Hafif Tahripli Silah | Sınır | -500,-100 | Kaçakçılık | Keşif ve Gözetleme |
| 14 | Mobil Birlik | 500, 136 | 3,03 | 100 | Yok | Y.M.-2 | 406,424 | Şüpheli birlik | Keşif ve Gözetleme |
| 15 | Mobil Birlik | -219, 47 | 2,24 | 100 | Ağır Tahripli Silah | G.M. | 0,0 | Saldırı | Çatışma |
| 16 | İHA | -121, 204 | 3,92 | 120 | Yok | H.B. | 330,70 | "İstihbarat | Keşif ve Gözetleme |

Çizelge 6. Probleme ilişkin temel varsayımlar (The basic assumptions related to the problem)

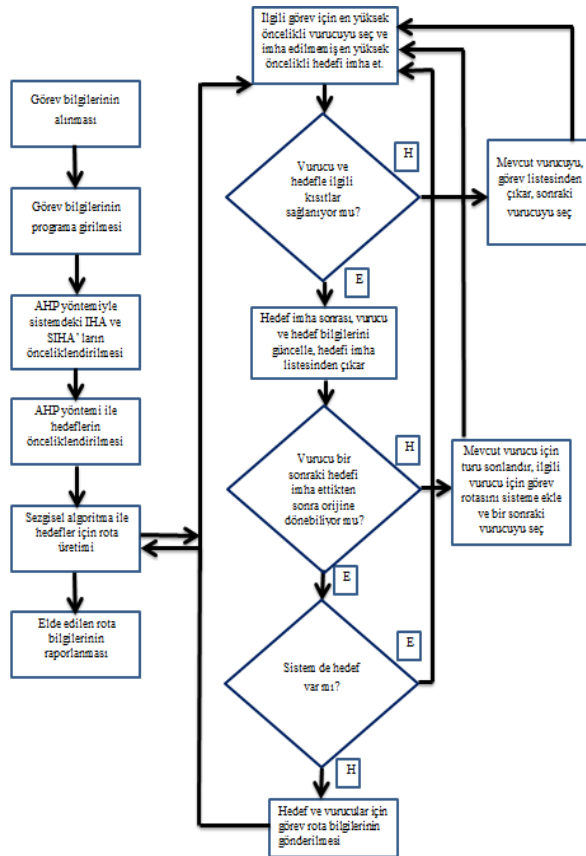
- Vurucular, hedeflerden daha fazla hıza sahip olmalıdır.
- Vurucu filosundaki araçların her biri birbirinden farklı özelliklere sahip olmakta ve her araçtan yalnızca bir adet bulunmaktadır.
- Vurucular, tüm hedefleri imha ettikten sonra başlangıç noktasına döneceklerdir.
- Hedefler ve vurucular (x, y) koordinat düzleminde, herhangi bir hız ve yönde hareket edebilirler.
- Vurucuların ve hedeflerin hızları zaman içerisinde değişmemektedir.
- Vurucuların her biri farklı özelliklere sahip olmakta yani heterojen filolu bir rotalama işlemi gerçekleştirilmektedir.
- Hedeflerin açıları zaman içerisinde değişmemektedir.
- Hedeflere ait yakıtlarının sınırsız olduğu ve hedeflerin belirli bir zaman aralığı içerisinde sistemde bulunduğu varsayılmaktadır.
- Vurucuların uçuş zaman kapasitesinin sınırlı olduğu yani havada belli bir süre kalabildiği, mühimmat kapasitesinin ise sınırsız olduğu varsayılmaktadır.
- Vurucu ve hedeflere ait sınırlı bir görev alanı ya da görev zamanı bulunmamaktadır.
- Vurucuların ve hedeflerin t=0 anında ilgili zaman aralığında sistemde hazır bulunduğu, bunlara ait hız, pozisyon ve açıların(vurucu açısı hariç) bilindiği varsayılmaktadır.
- Amaç tüm hedeflerin kabul edilebilir çözüm süresi içerisinde imha edildiği tur rotasını belirlemektir.
- Hedefe yönelen her vurucu İHA, hedefi başarılı bir şekilde imha etmiş, imha sonrası hedefin son durumu için ayrıca bir keşif ve gözetleme İHA' sını görevlendirilmemiştir.
- Sistemde t anından bulunan hedeflere ilişkin bilgilerin, SİHA' da bulunan radar sistemi ile yapılan taramalardan elde edildiği varsayılmıştır.

Asahiro vd., Asahiro vd., ve Bengt, çalışmalarında klasik tek vuruculu HHGSP'nin NP-Hard yapıda olduğunu göstermişlerdir [37], [38], [42]. Bu çalışmada klasik HHGSP problemine vurucuların ve hedeflerin heterojen özelliklere sahip olduğu varsayımı eklenmiş, klasik HHGSP'nin genel halı dikkate alınmıştır. Probleme ilişkin kısıtlamalar ve varsayımlar çizelge 6'da belirtilmektedir.

Problemin çözümü için AHP ve Sezgisel Algoritmaya dayalı bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. AHP ile vurucu ve hedeflerin önceliklendirilmesi yapılmış, Sezgisel Algoritma ile belirtilen öncelikler doğrultusunda ilgili kısıtlar dikkate alınarak tüm hedeflerin imha tur rotası belirlenmeye çalışılmıştır. Bir sonraki bölümde çözüm metodolojilerine ilişkin bilgiler verilecek ve dördüncü bölümde önerilen yöntem kullanılarak problem çözülecektir.

3. ÇÖZÜM METODOLOJİSİ (SOLUTION METHODOLOGY)

Bu çalışmada problemin çözülmesi için sezgisel bir yaklaşım önerilmekte ve vurucuların hedeflere doğru ve etkin bir şekilde yönlendirilmesi için AHP yönteminden faydalanılmaktadır. Şekil 3'de problem için geliştirilen algoritmaya ait akış diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3. Problem için önerilen çözüm mekanizması (The proposed solution mechanism for the problem)

Bu akış diyagramındaki karar mekanizmaları içerisinde bazı kısıtlamaları barındırmaktadır. Bu kısıtlamalar aşağıda ifade edilmektedir.

Karar mekanizması – 1: “Vurucu ve hedefle ilgili kısıtlar sağlanıyor mu?”

Bu mekanizmada vurucu kendi branşındaki göreve yönlendirildikten sonra, hedefin belirtilen zaman aralığı içerisinde imha edilip edilmediği, vurucunun havada kalma kapasitesinin aşıp aşılmadığı ve hedefi imha ettikten sonra orijine dönecek kadar yakıtının (endurance) olup olmadığı sorgulanmaktadır. Eğer bu şartlar sağlanmıyorsa, vurucu görev listesinden çıkartılmakta ve bir sonraki en yüksek öncelikli vurucu seçilerek algoritmanın ilgili adımları tekrarlanmaktadır.

Karar mekanizması – 2: “Vurucu bir sonraki hedefi imha ettikten sonra orijine dönebiliyor mu?”

Bu mekanizmada vurucunun ilgili hedefi imha ettiği ve bu hedefi imha ettikten sonra orijine dönebileceği doğrulandıktan sonra, bir sonraki hedefe yönlendirilip yönlendirilemeyeceğine karar verilmektedir. Eğer vurucu bir sonraki hedefi imha ettikten sonra orijine dönebilecek zamana sahipse göreve devam ettirilmekte, bu zamana sahip değilse vurucu için görev sonlandırılmakta ve görev rota bilgileri sisteme eklenmektedir.

Karar mekanizması – 3: “Sistem de hedef var mı?”

Bu mekanizmada, sistemde hedef olup olmadığı kontrol edilerek algoritma sonlandırılmaktadır. İmha edilmemiş hedef var ise algoritmanın adımları tekrarlanarak imha işlemi gerçekleştirilmekte, imha edilmemiş hedef yok ise algoritma sonlandırılarak tüm vurucu ve hedeflere ilişkin bilgiler programa gönderilmektedir.

İHA, SİHA ve Hedeflerin önceliklendirilmesine ilişkin bilgiler bölüm 3.1 içerisinde, bu analiz çalışmasına dayalı olarak yapılan uygulama çalışması bölüm 4 içerisinde ifade edilmektedir.

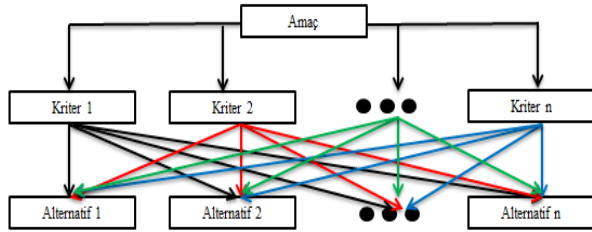
3.1 Analitik Hiyerarşik Proses (Analytical Hierarchical Process)

Thomas L. Saaty tarafından takdim edilen Analitik Hiyerarşik Proses (AHP) yöntemi, çok kriterli karar verme yöntemlerinden birisidir [44]. Yöntem de belirli kriterler altında farklı alternatifler arasından en iyi alternatifin seçilmesi amaçlanmaktadır. AHP yöntemi hiyerarşik bir yapıdan oluşmakta, bu yapıda amaç, kriterler temelinde, kriterler ise alternatifler temelinde değerlendirilmektedir.

AHP yönteminde ilk olarak çalışma içerisinde incelenecek problemin tanımlanması yapılmakta ve hiyerarşik yapısı oluşturulmakta, daha sonra alternatiflerin seçilmesine etki eden kriterler arasında bir karşılaştırma matrisi oluşturularak kriter önem dereceleri belirlenmektedir. Hesaplanan kriter öncelikleri için tutarlık değeri hesaplanmakta ve bu değer 0,1 den küçük ise yapılan değerlendirmenin tutarlı olduğu belirtilmektedir. Bu işlemlerden sonra her bir kriter için alternatifler değerlendirilerek yüzde önem dereceleri hesaplanmakta ve en uygun alternatif, sonuç dağılımından yararlanılarak belirlenmektedir. İlgili adımlar aşağıda detaylı bir şekilde ifade edilmektedir [45].

Adım 1. Problemin tanımlanması ve probleme ilişkin hiyerarşik yapının oluşturulması.

AHP yönteminde problemin çözümü için hiyerarşik bir yapı oluşturulmakta, bu yapının en üst kısmında amaç, alt kısmında ilgili amaca etki eden kriterler ve en alt kısımda aralarından ideal olanının belirlenmeye çalışıldığı alternatifler yer almaktadır. İlgili hiyerarşik yapı aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 4. AHP yöntemine ilişkin hiyerarşik yapı. (Hierarchical structure related to AHP method)

Adım 2. İkili karşılaştırma matrisinin oluşturulması.

Bu aşamada, kriterlerin ikili olarak karşılaştırılmasından hareketle bir karşılaştırma matrisi oluşturulmaktadır. Karşılaştırma yapılırken Saaty’ nin geliştirmiş olduğu skaladan yararlanılmakta, bu skala çizelge 7 de verilmektedir. [46].

Çizelge 7. İkili karşılaştırma matrisinde kullanılan değerlendirme skalası (Evaluation scale used in pairwise comparison matrix)

| Önem Derecesi | Tanım | Açıklama |
|---------------|-------------------------------------|---|
| 1 | Eşit önem | İki faktör amaca eşit şiddette katkıda bulunmaktadır. |
| 2 | Biraz önemli | |
| 3 | Orta derecede önemli | İlgili faktöre ilişkin tecrübe ve yargılar, diğer faktöre göre orta derecede bir öneme sahip olmaktadır. |
| 4 | Orta dereceden biraz daha önemli | |
| 5 | Kuvvetli derecede önemli | İlgili faktöre ilişkin tecrübe ve yargılar, diğer faktöre göre kuvvetli derecede bir öneme sahip olmaktadır. |
| 6 | Biraz daha kuvvetli derecede önemli | |
| 7 | Çok kuvvetli derecede önemli | İlgili faktöre ilişkin tecrübe ve yargılar, diğer faktöre göre çok kuvvetli derecede bir öneme sahip olmakta, bu faktör diğer faktöre oranla amaca kuvvetli derecede etki etmektedir. |
| 8 | Çok, çok kuvvetli derecede önemli | |
| 9 | Aşırı kuvvetli derecede önemli | Diğer faktöre kıyasla, en yüksek öneme sahip kritere ait dereceyi göstermektedir. |

Belirtilen ölçeklendirme doğrultusunda, kriterler için çizelge 8 deki ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmaktadır [45], [47].

Çizelge 8. Kriterlerin için oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi(Pairwise comparison matrix created for criteria)

| | Kriter 1 | Kriter 2 | Kriter ... | Kriter n |
|------------|----------|----------|------------|----------|
| Kriter 1 | a11 | a12 | ... | a1n |
| Kriter 2 | a21 | a22 | ... | a2n |
| Kriter ... | ... | ... | ... | ... |
| Kriter n | an1 | an2 | ... | ann |

Çizelgeye ilişkin matris formatı aşağıda belirtilmektedir [80].

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.1.1)$$

$$a_{i,j} = i. kriterin, j. kritere üstünlük derecesi$$

Elde edilen A matrisinden hareketle, adım 3’de kriterlere ilişkin görelî ağırlıkların hesaplaması yapılmaktadır.

Adım 3. Kriterlere ilişkin görelî ağırlıkların belirlenmesi [45], [47].

“A” ikili karşılaştırma matrisine dayalı olarak Bi sütun vektörü ve B sütun vektörlerinin matris formatına gelmesiyle C matrisi elde edilmektedir. Elde edilen C matrisinin satırlarında bulunan elemanların aritmetik ortalamalarının alınması sonucu W öncelik vektörü elde edilmektedir. Bu vektör aynı zamanda kriterlere ilişkin görelî ağırlıkları ifade eden vektördür. İlgili çözüm adımları aşağıda belirtilmektedir.

$$B_i = \begin{bmatrix} b_{i1} \\ b_{i2} \\ \dots \\ b_{in} \end{bmatrix} \quad b_{i,j} = \frac{a_{i,j}}{\sum_{i=1}^n a_{i,j}} \quad (3.1.2)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad C = [B_1 \ B_2 \ \dots \ B_n] \quad (3.1.3)$$

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} \quad w_i = \frac{\sum_{i=1}^n c_{ij}}{n} \quad (3.1.4)$$

Adım 4. Kriter kıyaslamalarına ilişkin tutarlılık değerinin ölçülmesi [45], [47].

AHP yönteminde karar vericilerin, kriterler arasında karşılaştırma yaparken tutarlı davranıp davranmadıklarını belirlemek ve tutarsız ise ilgili kıyaslamaların yeniden gözden geçirilmesini sağlamak için “Tutarlılık Oranı” hesaplanmaktadır. Bu oran sıfıra yakın olması karar matrisinin ve yapılan değerlendirmenin yüksek tutarlı olduğunu göstermekte, 0,1 den büyük olması ise yapılan değerlendirmenin tutarsız olduğunu ve yeniden değerlendirme yapılması gerektiğini göstermektedir. Tutarlılık Oranının hesaplanmasında aşağıdaki formülasyon kullanılmaktadır.

$$CR = \frac{CI(\text{Tutarlılık Göstergesi})}{RI(\text{Rassallık Göstergeleri})} \quad (3.1.5)$$

Tutarlık göstergesi (CI) değerinin hesaplanmasında aşağıda belirtilen adımlar uygulanmaktadır.

$$CR = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i} \quad (3.1.5)$$

Rassallık göstergesi (RI) nin hesaplanmasında çizelge 9 da belirtilen rassallık göstergeleri tablosundan faydalanılmaktadır.

Çizelge 9. Rassallık Göstergeleri (Random Index) [45], [47].

| | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| RI | 0 | 0 | 0,58 | 0,90 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 |
| N | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
| RI | 1,45 | 1,49 | 1,51 | 1,54 | 1,56 | 1,57 | 1,59 | |

Belirtilen işlemlerden elde edilen matris tutarlı ise adım 5'e geçilmektedir.

Adım 5. Her bir kriter bazında alternatiflere ait yüzde önem derecelerinin belirlenmesi [47].

Bu adımda her bir kriter için, alternatiflere yukarıdaki adımlar uygulanarak kriterler bazında alternatiflere ait yüzde önem dağılımları belirlenmektedir. Her bir kriter için yapılan değerlendirme sonucunda Si sütun vektörü elde edilmektedir. Bu vektör, ilgili kriter göre alternatiflere ait önem sırasını belirtmektedir.

$$S_i = \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{21} \\ \dots \\ S_{m1} \end{bmatrix} \quad (3.1.6)$$

Adım 6. Alternatiflere ilişkin önem sırasının belirlenmesi [47].

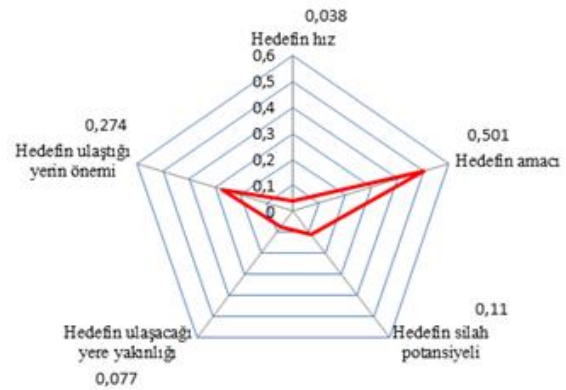
Bu adımda, elde edilen Si sütun vektörleri bir araya getirilerek K karar matrisi oluşturulmaktadır. K karar matrisinin adım 3 de belirlenen W öncelik vektörü ile çarpılmasıyla L vektörü (sütun vektör) elde edilmekte, bu vektör aynı zamanda alternatiflere ilişkin önem değerlerini belirtmekte ve bu vektördeki değerlerin toplamı 1 olmaktadır. İlgili formülasyon aşağıda ifade edilmektedir.

$$L = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & C_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & C_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{m1} & S_{m2} & \dots & C_{mn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \dots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \dots \\ L_m \end{bmatrix} \quad L = K \times W \quad (3.1.7)$$

Çalışmada AHP yönteminin adımları uygulanarak ve uzman görüşleri dikkate alınarak İHA, SİHA ve hedefler önceliklendirilmekte, AHP metodunun uygulanmasında “Expert Choice” yazılımından yararlanılmaktadır.

3.1.1 Hedeflerin önceliklendirilmesi (Prioritization of the targets)

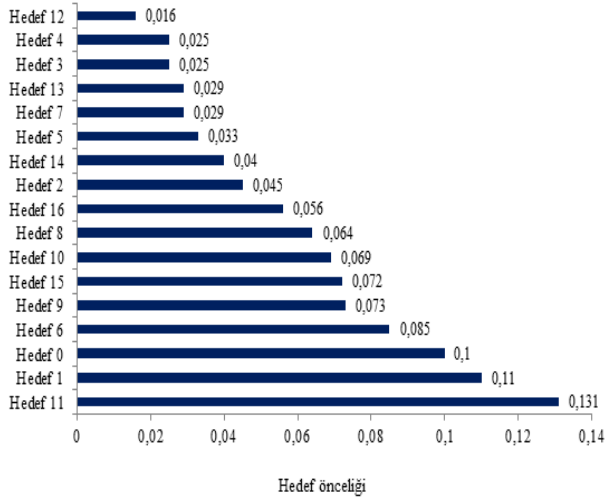
Problemde farklı teknik özellik ve amaçlara sahip 17 hedef bulunmaktadır. Vurucuların hedeflere etkin bir şekilde yönlendirilmesi için hedeflerin önceliklendirilmesi gerekmektedir. Çalışmada hedeflerin önceliklendirilmesi için uzman görüşüne dayalı olarak beş farklı kriter belirlenmiştir. Bu kriterler: hedefin hızı, hedefin ulaştığı yerin önemi, hedefin amacı, hedefin ulaşacağı yere yakınlığı ve hedefin silah potansiyeli şeklindedir. Gerçek hayat uygulamalarında uzmanlar, düşman unsurların amaçlarının ve taşıdığı mühimmat tiplerinin belirlenmesi ya da tahmin edilmesinde İHA, Mobese ve Güvenlik Kameraları görüntüleri ile iletişim araçları ve istihbarat elemanlarından faydalandığını ifade etmektedirler. AHP yöntemi ile bu kriterlere ait öncelikler belirlenmiş ve sonuçlar şekil 5 de gösterilmiştir.



Şekil 5. Hedef seçim kriterlerine ait öncelik değerleri (Priority values for the target selection criteria)

Şekil 5’ deki sonuçlardan hedef seçiminde en önemli kriterin “hedefin amacı” olduğu, bu kriteri “hedefin ulaşacağı yerin önemi” kriterinin takip ettiği, “hedefin hızı kriterinin” ise en düşük önemli kriter olduğu anlaşılmaktadır. Bu aşamadan sonra her bir kriter için alternatiflerin yüzde önem dağılımları hesaplanarak alternatif öncelik değerleri matrisi elde edilmektedir. İlgili matris, kriter öncelik değerleri ile çarpılarak alternatif önceliklerine ilişkin sonuç matrisi elde edilmekte ve şekil 6 da gösterilmektedir.

Şekil 6’da en yüksek önceliğe sahip hedefin “hedef 11 olduğu”, bu hedefleri “hedef 1” ve “hedef 0” m takip ettiği belirtilmektedir. Buna ek olarak en düşük öneme sahip hedeflerin ise “hedef 12”, “hedef 4” ve “hedef 3” olduğu, şekil 6 deki sonuçlardan çıkarılmaktadır.

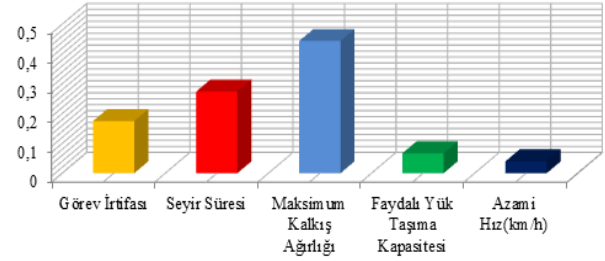


Şekil 6. Hedeflere ilişkin öncelik değerleri (Priority values for the targets)

3.1.2 Keşif ve gözetleme görevi için insansız hava aracı seçimi (Unmanned aerial vehicle selection for reconnaissance and surveillance)

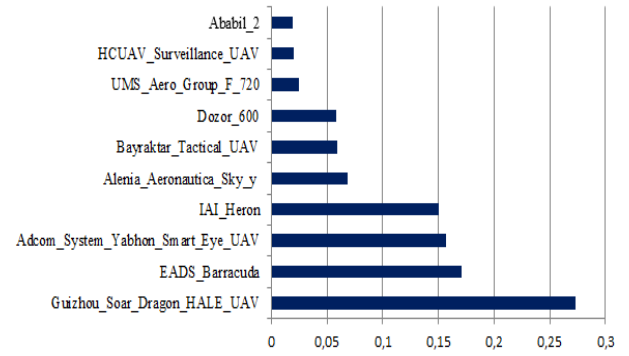
Problemde hedefler keşif-gözetleme ve çatışma olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Keşif ve gözetleme için farklı özelliklere sahip İHA'lar gerekirken, çatışma için farklı özelliklere sahip SİHA'lar gerekmektedir. Keşif ve gözetleme için geliştirilmiş çok sayıda insansız hava aracı bulunmasına karşın, bu çalışmada 10 farklı ülkenin geliştirmiş olduğu ve yoğun bir şekilde kullandığı 10 farklı insansız hava aracı dikkate alınmıştır. Bu araçların seçimine etki edebilecek kriterler uzman görüşü dikkate alınarak belirlenmiştir. Araçlara ve ilgili kriterlere ilişkin bilgiler çizelge 10'da gösterilmektedir.

Çizelge 10'da gösterilen bilgiler dikkate alınarak, AHP yöntemiyle önceliklendirme işlemi gerçekleştirilmiş, kriterlere ait öncelikler şekil 7'de, İHA'lara ait öncelikler ise şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Keşif ve gözetleme araçları için kriter öncelikleri (Criterion priorities for reconnaissance and surveillance vehicles)

Şekil 7'ye göre en yüksek öneme sahip kriterin "Maksimum Kalkış Ağırlığı" olduğu, bu kriteri "seyir süresi" kriterinin takip ettiği ve beşinci önem sırasındaki kriterin ise "azami hız" kriteri olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda alternatiflerin önceliklendirilmesi yapılmış ve elde edilen sonuçlar şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Keşif ve gözetleme araçlarına ilişkin öncelik değerleri (Priority values for reconnaissance and surveillance vehicles)

Şekil 8'e bakıldığında, ilgili alternatifler arasında en iyi İHA'nın Çin Halk Cumhuriyeti üretimi "Guizhou Soar Dragone" nun olduğu, en düşük performansa sahip aracın

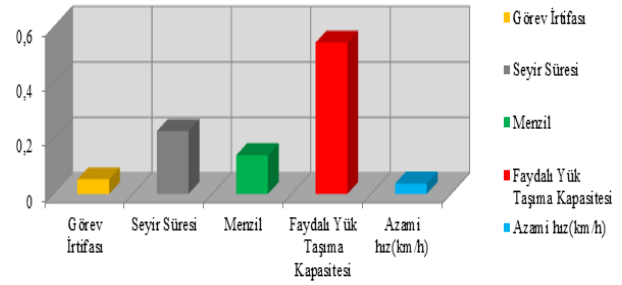
| Üreten Ülke | İHA Adı | Servis/Operasyonel İrtifası (ft) | Max Take Off Ağırlık (kg) | Faydalı Yük Taşıma Kapasitesi (Payload) (kg) | Azami-Maksimum hız(km/s) | Havada kalış süresi | Kaynak |
|---------------------------|---|----------------------------------|---------------------------|--|--------------------------|---------------------|---------|
| Türkiye | Bayraktar Tactical UAV | 27000 | 650 | 55 | 222 | 24 saat | [48] |
| İtalya | Alenia Aeronautica Sky-y, Research-Reconnaissance MALE | 25000 | 1200 | 150 | 260 ve üzeri | 14 saat | [49-51] |
| İsviçre | UMS Aero Group F-720 | 16000 | 250 | 70 | 200 | 12 saat | [52] |
| Rusya | Dozor 600, Reconnaissance-Attack Aircraft Late 2010 | 23293 | 720 | 210 | 210 | 24 saat | [53-54] |
| Birleşik Arap Emirlikleri | Adcom System Yabhon Smart Eye Unmanned Aerial Vehicle (UAV)s Yabhon | 23950 | 1000 | 550 | 222 | 120 saat | [55] |
| Çin | Guizhou Soar Dragon (Soar Eagle) HALE UAV | 59000 | 7500 | 650 | 750 ve üzeri | 10 saat | [56-58] |
| Yunanistan | HCUAV Surveillance UAV | 6561 | 185 | 35 | 190 | 11 saat | [59] |
| İran | Ababil 2 | 9800 | 83 | 40 | 370 | 2 saat | [60] |
| Almanya-İspanya | EADS Barracuda | 20000 | 3250 | 300 | 647 | 36 saat | [61-62] |
| İsrail | IAI Heron | 32800 | 1150 | 250 | 207 | 52 | [63] |

ise İran yapımı “Ababil 2” olduğu anlaşılmaktadır. Bir sonraki bölümde silahlı insansız hava aracı seçimi gerçekleştirilmekte, dördüncü bölümde ise uygulama çalışması ifade edilmektedir.

3.1.3 Silahlı insansız hava aracı seçimi (Unmanned combat aerial vehicle selection)

SİHA'lar ülkelerin son yıllarda yoğun bir şekilde çalıştıkları ve operasyonlarda etkin bir şekilde kullandıkları otonom sistemlerdir. Çalışmada ülkelerin kullandıkları 15 farklı SİHA dikkate alınarak rotalama işlemi gerçekleştirilmektedir. Rotalama işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için SİHA'lar önerilen sezgisel yöntem doğrultusunda AHP yöntemi ile önceliklendirilmektedir. Çalışmada dikkate alınan SİHA'lara ilişkin bilgiler çizelge 11'de, uzman görüşüne dayalı SİHA seçimine etki eden kriterlere ait öncelikler şekil 9'da ve SİHA'ların performans ölçütlerine göre sıralanması ise şekil 10'da gösterilmektedir.

Literatürdeki çalışmalara dayalı olarak ve ilgili kriterler dikkate alınarak yapılan analiz çalışması sonucunda AHP yöntemine göre elde edilen kriter öncelikleri şekil 9'da gösterilmektedir.



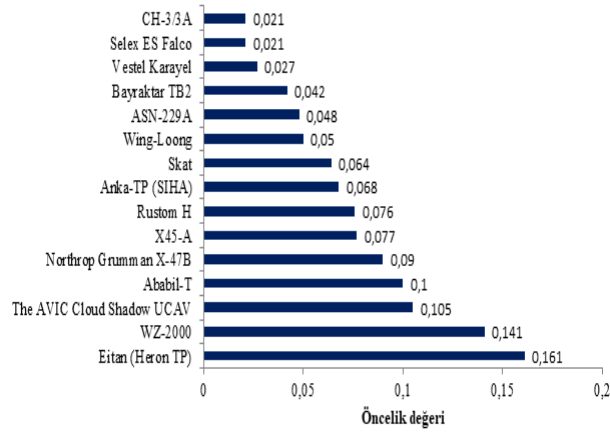
Şekil 9. Kriterler ait öncelik sıralaması (Priority ranking for criteria)

Şekil 9'a bakıldığında, SİHA'ların önceliklendirilmesinde en önemli kriterin “Faydalı Yük Taşıma Kapasitesi”, en düşük önemli kriterin ise “Azami Hız” olduğu anlaşılmaktadır. Bu kriter öncelikleri doğrultusunda SİHA'ların sıralanmasına ilişkin bilgiler şekil 10'da gösterilmektedir.

Şekil 10'a bakıldığında en yüksek performanslı SİHA'nın Eitan (Heron TP): en düşük performanslı SİHA'nın ise “CH-3/3A” ve “Selex ES Falco” olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 11. Silahlı insansız hava araçlarına ilişkin bilgiler (Information for unmanned combat aerial vehicle)

| Üreten Ülke | SIHA Adı | Servis/Operasyonel İrtifası | Menzil | Faydalı Yük Taşıma Kapasitesi | Azami hız(km/s) | Havada Kalış Süresi | Kaynak |
|-------------|----------------------------|-----------------------------|---------|-------------------------------|-----------------|----------------------|---------|
| Çin | The AVIC Cloud Shadow UCAV | 46000 ft | 297 km | 399 kilogram | 619 | 6 saat | [64-65] |
| ABD | Northrop Grumman X-47B | 42000 ft | 3889 km | 2000 kilogram | 1102,536 | 6 saat | [66-67] |
| Çin | ASN-229A | 32800 ft | 1998 km | 100 kilogram | 180 | 20 saat | [68] |
| Çin | CH-3/3A | 16400 ft | 2398 km | 60 kilogram | 200 | 12 saat | [68] |
| Çin | Wing-Loong | 16400 ft | 4000 km | 200 kilogram | 280 | 20 saat | [68] |
| Çin | WZ-2000 | 59000 ft | 2400 km | 80 kilogram | 800 | 3 saat | [68] |
| İran | Ababil-T | 14000 ft | 50 km | 40 kilogram | 300 | 1,5 saat | [68] |
| İsrail | Eitan (Heron TP) | 45000 ft | 7400 km | 2000 kilogram | 370 | 70 saat ve üzeri | [69-71] |
| Rusya | Skat | 39370 ft | 1996 km | 2000 kilogram | 850 | 15 saat | [72-74] |
| ABD | X45-A | 40000 ft | 2405 km | 680 kilogram | 919 | 15 saat | [75-76] |
| İtalya | Selex ES Falco | 21325 ft | 200 km | 70 kilogram | 216 | 18 saat | [77-78] |
| Hindistan | Rustom H | 35000 ft | 350 km | 350 kilogram | 225 | 24 ile 48 saat arası | [79-80] |
| Türkiye | Bayraktar TB2 | 27000 ft | 150 km | 55 kilogram | 222 | 24 saat ve üzeri | [81-82] |
| Türkiye | Anka-TP (SIHA) | 30000 ft | 4896 km | 200 kilogram | 217 | 24 saat | [83-84] |
| Türkiye | Vestel Karayel | 22500 ft | 150 km | 70 kilogram | 148 | 20 saat ve üzeri | [85-87] |



Şekil 10. Alternatiflere ait öncelik sıralaması (Priority ranking for alternatives)

Bir sonraki bölümde vurucu ve hedef öncelikleri dikkate alınarak rotalama işlemi gerçekleştirilmektedir.

4. UYGULAMA ÇALIŞMASI (APPLICATION STUDY)

Uygulama çalışmasında, ülkelerin gerçek hayat problemlerinde karşılaştıkları terör ve tehdit unsurlarının davranışlarına paralel olarak heterojen özellikte 17 farklı

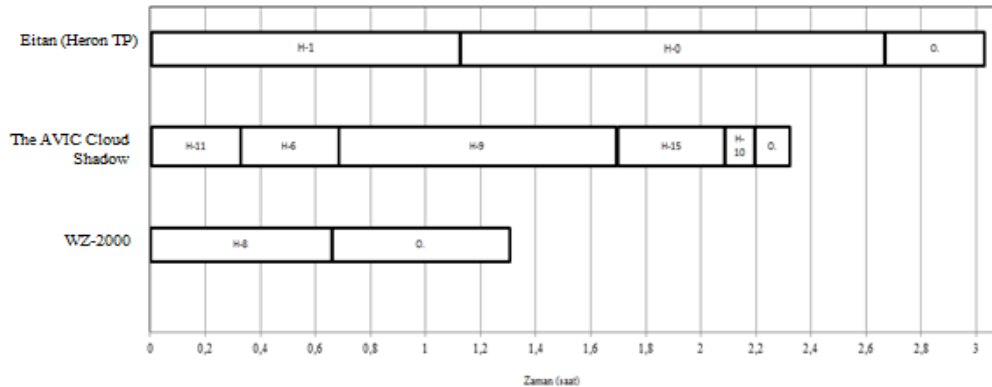
hedef tasarlanmış ve bu hedeflere ilişkin bilgiler bölüm 2 içerisinde verilmiştir. Belirtilen hedeflerin imhası için ülkelerin geliştirmiş oldukları ve yoğun şekilde kullandıkları 10 farklı İHA ile 15 farklı SIHA'dan oluşan uçuş filosu dikkate alınmış ve önerilen sezgisel algoritma ile kabul edilebilir çözüm süresi içerisinde az sayıda araç kullanarak etkin bir hedef imha rotası oluşturulmaya çalışılmıştır. Algoritmanın çözümü 4 GB RAM ve 2,3 GHz işlemcili bilgisayarda C# programı kullanılarak gerçekleştirilmiş, elde edilen tur rotası çizelge 12'de gösterilmiştir.

Çizelge 12'de çatışma görevinde kullanılan araçların hedefleri imha etme sırasına ve zamanına ilişkin bilgiler ile keşif ve gözetleme görevinde kullanılan İHA'ların hedefleri gözlemledikleri zamana ve gözlem sırasına ilişkin bilgiler gösterilmektedir. Çizelge 12'de ifade edilen sonuçların zaman doğrusu üzerinde gösterimi şekil 11 ve şekil 12'de belirtilmektedir.

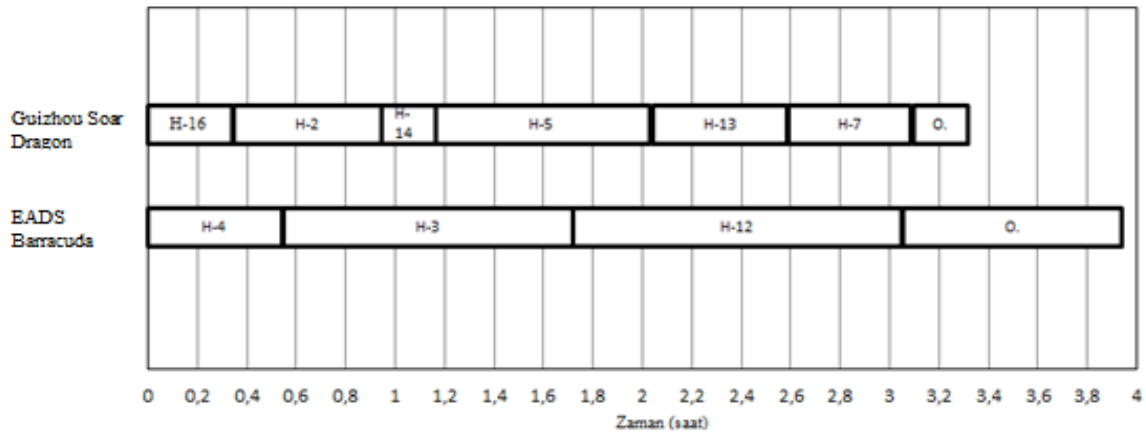
Şekil 11'e bakıldığında vurucu ve hedefler için öncelik değerleri dikkate alınarak, ilgili zaman dilimleri içerisinde hedeflerin imha edildiği ve on vurucudan yalnızca üçü ile görevlerin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Buna göre en yüksek önceliğe sahip üç vurucu operasyonda kullanılmış ve her

Çizelge 12. Uygulama çalışması sonuçları (Results of the application study)

| Çatışma Sonuçları | |
|---------------------------------|--|
| Eitan (Heron TP) | Orijin – hedef 1 – hedef 0 – Orijin |
| Görev imha zamanı | 0 – 1,15373 – 2,66644 – 3,04 |
| WZ-2000 | Orijin – hedef 11 – hedef 6 – hedef 9 – hedef 15 – hedef 10 – Orijin |
| Görev imha zamanı | 0 – 0,38502 – 0,76435 – 1,6492 – 2,15286 – 2,19471 – 2,22 |
| The AVIC Cloud Shadow | Orijin – hedef 8 – Orijin |
| Görev imha zamanı | 0 – 0,6693 – 1,34 |
| Keşif Sonuçları | |
| Guizhou Soar Dragon | Orijin – hedef 16 – hedef 2 – hedef 14 – hedef 5 – hedef 13 – hedef 7 – Orijin |
| Hedef gözetleme zamanı | 0 – 0,28438 – 0,98026 – 1,19578 – 2,01519 – 2,60327 – 3,15358 – 3,22 |
| EADS Barracuda | Orijin – hedef 4 – hedef 3 – hedef 12 – Orijin |
| Hedef gözetleme zamanı | 0 – 0,56097 – 1,78268 – 3,08205 – 3,95 |
| Algoritma toplam çalışma zamanı | 2 saniye 48 salise |



Şekil 11. Çatışma operasyonu için hedef imha sırası (Target destruction order for conflict operation)

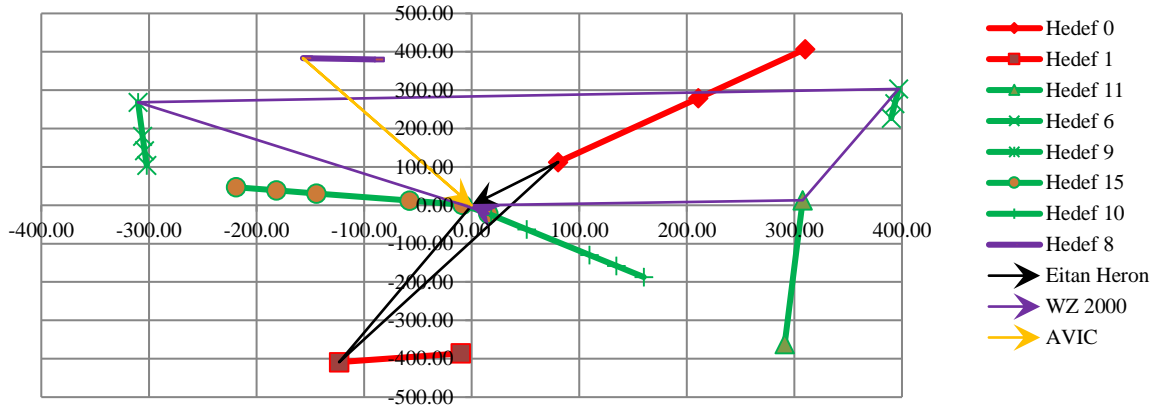


Şekil 12. Keşif ve gözetleme operasyonu için hedef imha sırası (Target destruction order for reconnaissance and surveillance)

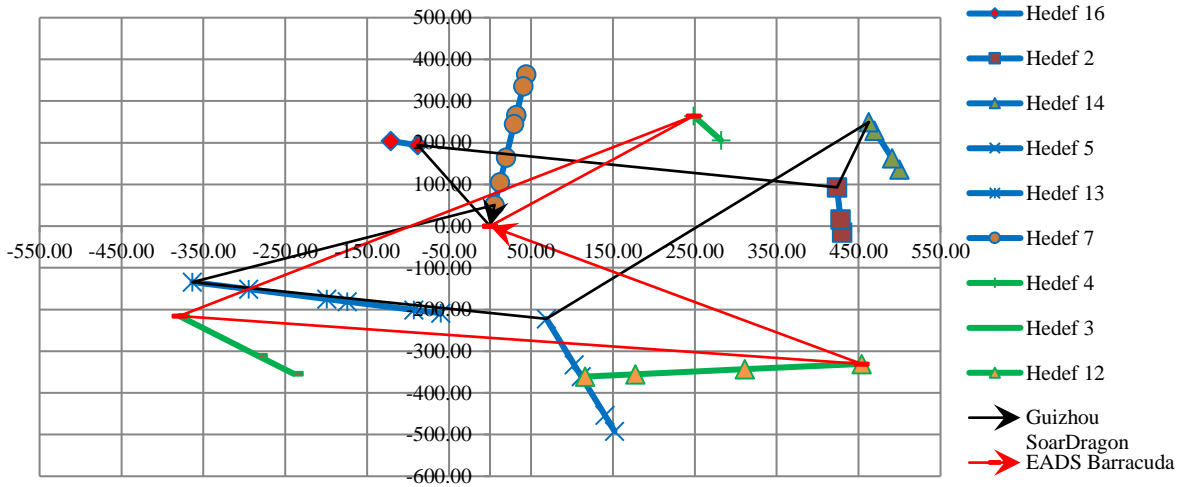
bir vurucu için yüksek önceliğe sahip hedefler ilk olarak imha edilmiştir. Şekil 11'de "O." yazılı kutular ise ilgili vurucunun orijine dönüş zamanını ifade etmektedir.

Şekil 12'ye bakıldığı zaman en yüksek önceliğe sahip iki araçla tüm hedefler başarılı bir şekilde imha edilmekte,

geriye kalan 8 aracın kullanılmamasıyla maddi anlamda tasarruf sağlanabileceği öngörülmekte ve göreve çıkan tüm vurucularda hedeflerin öncelik seviyelerine göre imha edildiği tespit edilmektedir. Koordinat ekseninde çatışma ve keşif görevlerine ilişkin vuruculara



Şekil 13. Koordinat ekseninde çatışma operasyonu için görev imha sırası (Target destruction order for conflict operation on the coordinate axis)



Şekil 14. Koordinat ekseninde keşif operasyonu için görev imha sırası (Target destruction order for reconnaissance and surveillance operation on the coordinate axis)

ve hedeflere ait görev rotaları şekil 13 ve 14 içerisinde detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Yukarıdaki bilgiler doğrultusunda tüm hedeflerin belirtilen zaman aralığı içerisinde ilgili öncelikler doğrultusunda belirlenmiş olan varış noktasına varmadan az sayıda vurucu ile imha edildiği tespit edilmiştir. Buna ek olarak algoritmanın etkinliği test etmek için hedef sayısının 40 ile 200, vurucu sayısının 10 ile 50 arasında değiştiği 25 farklı senaryo üretilmiştir. İlgili senaryolarda hedeflere ilişkin bilgiler çizelge 13 de, vuruculara ilişkin bilgiler ise çizelge 14 de gösterilmiştir. Çizelgedeki hedef ve vurucu hızları, bölüm ikideki ifade edilen hedefler ile bölüm üçte belirtilen İHA'lara ve SİHA'lara ait minimum ve maksimum hızlardan yola çıkarak

belirlenmiştir. Belirtilen parametreler doğrultusunda 4 GB RAM ve 2,3 GHz işlemcili bilgisayarda C# programı kullanılarak analiz çalışması yapılmış, elde edilen sonuçlar şekil 15 ve şekil 16 da gösterilmiştir.

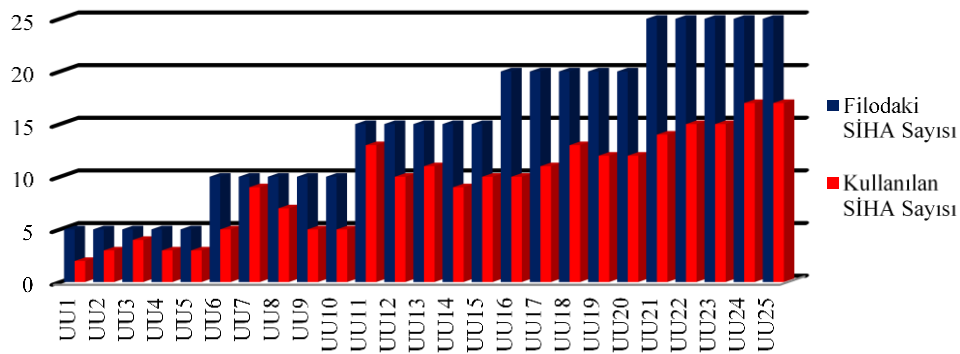
Şekil 16' daki sonuçlardan tüm senaryolarda SİHA kullanımından tasarruf sağlandığı, maksimum tasarrufun "UU1" senaryosundan, minimum tasarrufun ise "UU7" senaryosundan elde edildiği anlaşılmaktadır. Buna ek olarak tüm senaryolarda ilgili hedeflerin tamamının SİHA' lar tarafından belirlenen zaman aralığı içerisinde başarılı bir şekilde etkisizi hale getirildiği tespit edilmiştir.

Çizelge 13. Senaryolardaki hedeflere ilişkin parametrik bilgiler (Parametric information about targets in scenarios)

| Hedef Sayısı | X Koordinatı (km) | Y koordinatı (km) | Hedef Minimum Hız (km/s) | Hedef Maksimum Hız (km/s) | Hedef Sistemden Çıkış Zamanı Minimum (s) | Hedef Sistemden Çıkış Zamanı Maksimum (s) | Hedef Öncelikleri (puan) |
|--------------|-------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|--|---|--------------------------|
| 40 | [-500, +500] | [-500, +500] | 100 | 140 | 2 | 6 | [1, 1000] |
| 80 | [-625, +625] | [-625, +625] | 100 | 140 | 2 | 6 | [1, 1000] |
| 120 | [-750, +750] | [-750, +750] | 100 | 140 | 2 | 6 | [1, 1000] |
| 160 | [-875, +875] | [-875, +875] | 100 | 140 | 2 | 6 | [1, 1000] |
| 200 | [-1000, +1000] | [-1000, +1000] | 100 | 140 | 2 | 6 | [1, 1000] |

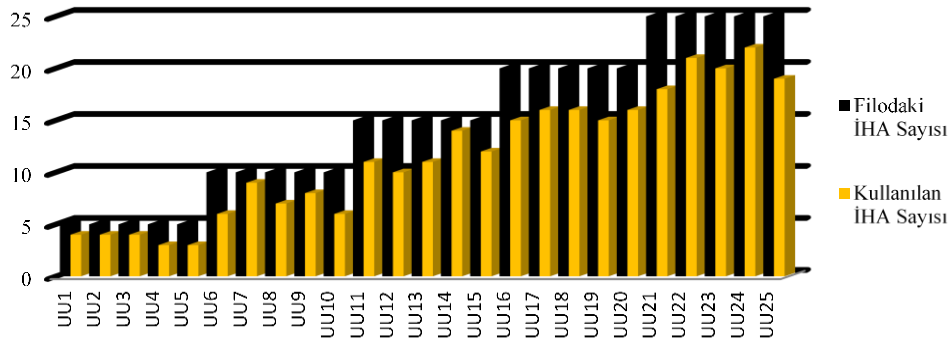
Çizelge 14. Senaryolardaki vuruculara ilişkin parametrik bilgiler (Parametric information about pursuers in scenarios)

| Araç Tipi | Minimum Hız (km/s) | Maksimum Hız (km/s) | Minimum Uçuş Kapasitesi (s) | Maksimum Uçuş Kapasitesi (s) | Vurucu Öncelikleri |
|-----------|--------------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------|
| İHA | 190 | 750 | 5 | 15 | [1, 1000] |
| SİHA | 148 | 1102 | 5 | 15 | [1, 1000] |



| Senaryo | UU1 | UU2 | UU3 | UU4 | UU5 | UU6 | UU7 | UU8 | UU9 | UU10 | UU11 | UU12 | UU13 | UU14 | UU15 | UU16 | UU17 | UU18 | UU19 | UU20 | UU21 | UU22 | UU23 | UU24 | UU25 |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Tasarruf Oranı(%) | 60 | 40 | 20 | 40 | 40 | 50 | 10 | 30 | 50 | 50 | 13 | 33 | 27 | 40 | 33 | 50 | 45 | 35 | 40 | 40 | 44 | 40 | 40 | 32 | 32 |

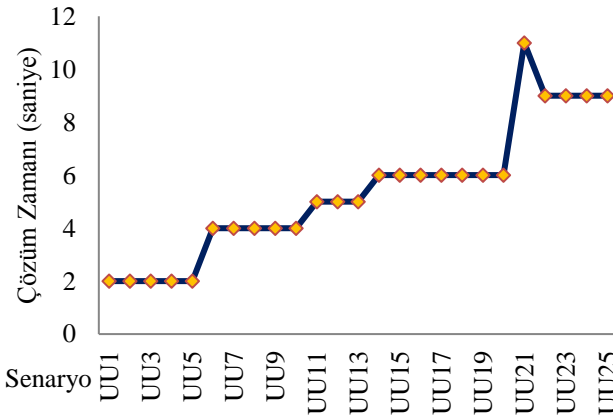
Şekil 16. SİHA kullanımına ilişkin deneysel analiz sonuçları (Results of experimental analysis on the use of UCAV)



| Senaryo | UU1 | UU2 | UU3 | UU4 | UU5 | UU6 | UU7 | UU8 | UU9 | UU10 | UU11 | UU12 | UU13 | UU14 | UU15 | UU16 | UU17 | UU18 | UU19 | UU20 | UU21 | UU22 | UU23 | UU24 | UU25 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Tasarruf Oran(%) | 20 | 20 | 20 | 40 | 40 | 40 | 10 | 30 | 20 | 40 | 27 | 33 | 27 | 7 | 20 | 25 | 20 | 20 | 25 | 20 | 28 | 16 | 20 | 12 | 24 |

Şekil 17. İHA kullanımına ilişkin deneysel analiz sonuçları (Results of experimental analysis on the use of UAV)

Şekil 17’deki sonuçlar incelendiği zaman, tüm senaryolarda İHA kullanımından tasarruf sağlandığı, maksimum tasarrufun “UU4”, “UU5” ve “UU6” senaryolarından sağlandığı, minimum tasarrufun ise “UU14” senaryosundan sağlandığı tespit edilmiştir. Ayrıca, tüm senaryolarda ilgili hedeflerin tamamı belirlenen zaman aralığı içerisinde İHA’lar tarafından gözlemlenmiş ve keşfedilmiştir.



Şekil 18. Çözüm zamanı açısından deneysel analiz sonuçları (Experimental)

Çözüm zamanı açısından deneysel analiz sonuçları incelendiği zaman algoritmanın oldukça iyi bir performans gösterdiği tespit edilmiştir. Algoritmanın tüm senaryolarda saniyeler içerisinde hedefleri sınıflandırıp minimum sayıda araçla uygun görev rotalarını ürettiği şekil 18’deki sonuçlardan anlaşılmaktadır.

5. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Birçok ülke ulusal güvenliğini sağlamak adına askeri operasyonlarda terör ve tehdit unsurlarını etkisiz hale getirmek için insansız hava aracı filolarını yoğun bir şekilde kullanmaktadır. Askeri operasyonlar; anlık olarak planlanması, kısa sürelerde doğru ve etkili çözümlerin üretilmesi gereken stratejik görev alanlarıdır. Kısa sürelerde karar verilmesi gereken operasyonlarda yanlış planlanmış görev rotaları, ulusal güvenlik açısından geri dönüşü mümkün olmayan sonuçlar doğurabilmekte, bu nedenden dolayı askeri operasyonlarda kabul edilebilir çözüm süreleri içerisinde maksimum başarı ile görevlerin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada önerilen çözüm mekanizması ile operasyon alanındaki hedeflerin tamamının hızlı ve etkili bir şekilde kabul edilebilir çözüm zamanı içerisinde imha edildiği tespit edilmiştir.

Çalışmada hedefler zaman içerisinde sürekli konum değiştirmekte, her bir hedef farklı amaçlara ve zaman penceresine sahip olmaktadır. Buna ek olarak, vurucular silahlı ve keşif-gözetleme olmak üzere iki fiyoda ayrılmakta, her bir fiyoda farklı özelliklere sahip vurucular bulunmakta ve bu vurucular sınırlı bir süre havada kalabilmektedir. Çalışma sonucunda, bu varsayımlar ve kısıtlamalar altında kabul edilebilir çözüm süresi içerisinde tüm filoların doğru hedeflere eş zamanlı olarak rotalanması amaçlanmakta, belirtilen özelliklerden dolayı çalışmanın literatürde ilk olma özelliği taşıdığı düşünülmektedir.

Silahlı insansız hava araçları, gelecek yıllar içerisinde suikast ve toplu saldırılar için önemli bir araç olma potansiyeline sahiptir. Boyutu küçük olan ve taşıdığı gram ağırlığındaki mermilerle öldürücü güce sahip olabilen silahlı insansız hava araçları ve dronelarla etkili bir şekilde mücadele etmek ancak aynı cinsten araçların etkin ve başarılı bir şekilde rotalanması ile mümkün olacaktır. Bu çalışmanın, belirtilen olayların

engellenmesinde bir çözüm yaklaşımı olarak kullanılabilirliği, önerilen yöntemin geliştirilmesi ve farklı yöntemlere entegre edilmesi ile daha başarılı sonuçların alınabileceği öngörülmektedir. Belirtilen yöntemin ayrıca askeri operasyonlar başta olmak üzere, arama-kurtarma faaliyetleri ve lojistik hizmetlerinde kullanılan İHA'lar için uygun görev rotasının belirlenmesinde etkili bir şekilde kullanılabilirliği tahmin edilmektedir.

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (CONCLUSION AND EVALUATION)

İnsansız hava araçları yeni nesil hava araçlarından biri olup, askeri operasyonlardan lojistiğe, keşif ve gözetleme görevlerinden, ziraate kadar geniş bir alanda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Birçok ülke, ulusal güvenliğini sağlamak ve terör unsurlarını engellemek için sıklıkla bu araçlara başvurmakta, keşif ve gözetleme yapan İHA'lar ile düşman unsurlarını takip ederken, SİHA'lar sayesinde anlık olarak bu unsurları etkisiz hale getirmektedir. Burada önemli olan noktalardan birini filo halinde hareket eden insansız hava araçlarının etkin bir şekilde rotalanması problemi oluşturmaktadır. Özellikle aynı operasyon alanı içerisinde farklı görevlerin eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesi gerektiği durumlarda, ilgili araçların doğru hedeflere yönlendirilmesi büyük bir öneme sahip olmaktadır. Anlık, hızlı ve doğru karar verilmesi gereken askeri operasyonlarda, yanlış planlanmış görev rotaları ölüm, yaralanma ya da toprak kaybı gibi geri dönüşü mümkün olmayan sonuçlara sebebiyet verebilmektedir. Bu çalışmada heterojen filolu insansız hava araçları ile (Silahlı-Silahsız İHA) aynı operasyon alanı içerisinde farklı amaç ve özelliklere sahip hedeflerin kabul edilebilir çözüm süresi içerisinde imha edilebilmesi için yeni bir sezgisel çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen algoritma farklı senaryolar üzerinde test edilmiş, sonuç olarak tüm senaryolarda hedeflerin kabul edilebilir çözüm süresi içerisinde az sayıda araç kullanılarak imha edildiği tespit edilmiştir. Çalışmanın İHA ve SİHA rotalama problemlerinin çözümünde bir çözüm basamağı olarak kullanılabilirliğinin yanı sıra görevlere yönelik heterojen filo oluşturma aşamasında da faydalı bir şekilde uygulanabileceği düşünülmüş, gelecek çalışmalarda önerilen algoritmanın geliştirilmesi ve ilgili araçlara entegre edilmesiyle daha etkili sonuçların alınabileceği öngörülmüştür.

BİLGİLENDİRME (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma TÜBİTAK-BİDEB 2211 doktora burs programı ile desteklenmektedir

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1]. Kahveci, M., & Nazlı, C. A. N. (2017). İnsansız Hava Araçları: Tarihiçesi, Tanımı, Dünyada Ve Türkiye'deki Yasal Durumu. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(4): 511-535.

- [2]. Kök, T. (2012). İnsansız Hava Araçlarının Güvenli Kullanımı için Spektrum İhtiyaçlarının Belirlenmesi ile İlgili Öneriler. Teknik Uzmanlık Tezi, İstanbul, Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu.
- [3]. Rana, K., Praharaj, S. & Nanda, T. (2016). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): An Emerging Technology for Logistics. *International Journal of Business and Management Invention*, 5(5): 86-92.
- [4]. <http://www.bilgesam.org/Images/Dokumanlar/0-2-2014021955insansizhava-araclari.pdf> Erişim tarihi 27.12.2018.
- [5]. Szabolcsi, R. (2016). UAV Operator Training–Beyond Minimum Standards. *International Scientific Committee*, 193.
- [6]. D'Alessandro, A., Bucalo, F., Coltelli, M., & Martorana, R. (2015, September). Drones-New Technologies for Geophysics?. *In Near Surface Geoscience 2015-21st European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.
- [7]. Bento, M. D. F. (2008). Unmanned aerial vehicles: an overview. *Inside GNSS*, 3(1): 54-61.
- [8]. https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:8MQhO-iYTwoJ:https://tr.wikipedia.org/wiki/%25C4%25B0nsa ns%25C4%25B1z_hava_arac%25C4%25B1+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 29.12.2018
- [9]. Helvig, C. S., Robins, G., & Zelikovsky, A. (1998, August). Moving-target TSP and related problems. *In European Symposium on Algorithms (pp. 453-464)*. Springer Berlin Heidelberg.
- [10]. Fügenschuh, A., Knapp, M., & Rothe, H. (2014). The Multiple Traveling Salesmen Problem with Moving Targets. Helmut-Schmidt-Univ., Professur für Angewandte Mathematik.
- [11]. Stieber, A., Fügenschuh, A., Epp, M., Knapp, M., & Rothe, H. (2015). The multiple traveling salesmen problem with moving targets. *Optimization Letters*, 9(8): 1569-1583.
- [12]. Stieber, A., & Fügenschuh, A. (2016). Variants in Modeling Time Aspects for the Multiple Traveling Salesmen Problem with Moving Targets.
- [13]. Jiang, Q., Sarker, R., & Abbass, H. (2005). Tracking moving targets and the non-stationary traveling salesman problem. *Complexity International*, 11(2005): 171-179.
- [14]. Jindal, P., & Kumar, A. (2011). Multiple Target Intercepting Traveling Salesman Problem, *International Journal of Computer Science and Technology*, 2(2): 327-331.
- [15]. Englot, B., Sahai, T., & Cohen, I. (2013, December). Efficient tracking and pursuit of moving targets by heuristic solution of the traveling salesman problem. *In Decision and Control (CDC): 2013 IEEE 52nd Annual Conference on (pp. 3433-3438)*. IEEE.
- [16]. Jindal, P., Kumar, A., & Kumar, S. (2011). Dynamic version of Traveling Salesman Problem. *International Journal of Computer Applications* (0975–8887): 19(1).
- [17]. Khosravi, M., & Aghdam, A. G. (2014, December). Cooperative receding horizon control for multi-target interception in uncertain environments. *In Decision and Control (CDC): 2014 IEEE 53rd Annual Conference on (pp. 4497-4502)*. IEEE.

- [18]. Zhou, A., Kang, L., & Yan, Z. (2003, December). Solving dynamic TSP with evolutionary approach in real time. *In Evolutionary Computation, 2003. CEC'03. The 2003 Congress on (Vol. 2, pp. 951-957)*. IEEE.
- [19]. Choubey, N. S. (2013). Moving Target Travelling Salesman Problem Using Genetic Algorithm. *International Journal of Computer Applications*, 70(2).
- [20]. Lee, Z. J., Lee, C. Y., & Su, S. F. (2002). An immunity-based ant colony optimization algorithm for solving weapon-target assignment problem. *Applied Soft Computing*, 2(1): 39-47.
- [21]. Agharkar, P., & Bullo, F. (2014, June). Vehicle routing algorithms to intercept escaping targets. *In American Control Conference (ACC): 2014* (pp. 952-957). IEEE.
- [22]. Knapp, M., & Rothe, H. (2012). Concept for simulating engagement strategies for C-RAM systems using laser weapons. *Proceedings of the DMMS*.
- [23]. Ries, J., & Ishizaka, A. (2012, December). A multi-criteria support system for dynamic aerial vehicle routing problems. *In Communications, Computing and Control Applications (CCCA): 2012 2nd International Conference on (pp. 1-4)*. IEEE.
- [24]. Bourjolly, J. M., Gurtuna, O., & Lyngvi, A. (2006). On-orbit servicing: a time-dependent, moving-target traveling salesman problem. *International Transactions in Operational Research*, 13(5): 461-481.
- [25]. Blough, O. P., Farrington, T. K., & Hudson, J. (2016). Trojan Asteroid Mission Design: Target Selection And Sequencing Optimization.
- [26]. Mei, G., Ran, X., Fang, D., & Zhang, C. (2015). Improved Satellite Scheduling Algorithm for Moving Target. *In Proceedings of The fourth International Conference on Information Science and Cloud Computing (ISCC2015)*. 18-19 December 2015. Guangzhou, China. Online at <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=264>, id. 58.
- [27]. Groba, C., Sartal, A., & Vázquez, X. H. (2015). Solving the dynamic traveling salesman problem using a genetic algorithm with trajectory prediction: An application to fish aggregating devices. *Computers & Operations Research*, 56, 22-32.
- [28]. Mercer, G., Barry, S. I., Marlow, D. O., & Kilby, P. (2008). Investigating the effect of detection and classification range and aircraft dynamics on a. *ANZIAM Journal*, 49, 475-492.
- [29]. Kilby, P., Tobin, P., Luscombe, R., Barry, S. I., & Hickson, R. (2007). The maritime surveillance problem.
- [30]. Marlow, D. O., Kilby, P., & Mercer, G. N. (2007, December). The travelling salesman problem in maritime surveillance-techniques, algorithms and analysis. *In Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation* (pp. 684-690).
- [31]. Fang, F., Jiang, A. X., & Tambe, M. (2013). Protecting moving targets with multiple mobile resources. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 48, 583-634.
- [32]. Cross, M., Marlow, D., & Looker, J. (2007). Application of the non-stationary travelling salesman problem to maritime surveillance. *Proceedings of MISG*, 1-4.
- [33]. Shuttleworth, R., Golden, B. L., Smith, S., & Wasil, E. (2008). Advances in meter reading: Heuristic solution of the close enough traveling salesman problem over a street network. *In The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges (pp. 487-501)*. Springer US.
- [34]. Del Bimbo, A., & Pernici, F. (2005, October). Distant targets identification as an on-line dynamic vehicle routing problem using an active-zooming camera. In Visual Surveillance and Performance Evaluation of Tracking and Surveillance, 2005. *2nd Joint IEEE International Workshop on (pp. 97-104)*. IEEE.
- [35]. Bimbo, A. D., & Pernici, F. (2005, June). Saccades planning with kinetic TSP for distant targets identification. In Imaging for Crime Detection and Prevention, 2005. *ICDP 2005. The IEE International Symposium on (pp. 145-149)*. IET.
- [36]. Ilavarasi, K., & Joseph, K. S. (2014, February). Variants of travelling salesman problem: A survey. *In Information Communication and Embedded Systems (ICICES): 2014 International Conference on (pp. 1-7)*. IEEE.
- [37]. Asahiro, Y., Horiyama, T., Makino, K., Ono, H., Sakuma, T., & Yamashita, M. (2004). How to collect balls moving in the Euclidean plane. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 91, 229-245.
- [38]. Asahiro, Y., Miyano, E., & Shimoirisa, S. (2008). Grasp and delivery for moving objects on broken lines. *Theory of Computing Systems*, 42(3): 289-305.
- [39]. Chalasani, P., Motwani, R., & Rao, A. N. I. L. (1996, July). Algorithms for robot grasp and delivery. *In 2nd International Workshop on Algorithmic Foundations of Robotics*.
- [40]. Papadakos, N., Tzallas-Regas, G., Rustem, B., & Thoms, J. (2011). Risky traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, 212(1): 69-73.
- [41]. Hammar, M., & Nilsson, B. J. (1999, July). Approximation results for kinetic variants of TSP. *In International Colloquium on Automata, Languages, and Programming (pp. 392-401)*. Springer Berlin Heidelberg.
- [42]. Bengt, J. (2002). Approximation Results for Kinetic Variants of TSP. *Discrete & Computational Geometry*, 4(27).
- [43]. Karakaya, M. En Az Sayıda İnsansız Hava Aracı Kullanarak Sabit Hedeflerin Gözetlenmesinin Planlanması.
- [44]. Akdeniz, H. A., & Turgutlu, T. (2007). Türkiye’de perakende sektöründe analitik hiyerarşik süreç yaklaşımıyla tedarikçi performans değerlendirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 9(1): 1-17.
- [45]. Ömürbek, N., & Şimşek, A. (2014). Analitik Hiyerarşik Süreci Ve Analitik Ağ Süreci Yöntemleri İle Online Alışveriş Site Seçimi. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 12(22): 306-327.
- [46]. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1): 83-98.
- [47]. http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Y9PrXQxWpeIJ:www.deu.edu.tr/userweb/k.yaralioglu/dosyalar/Analitik_Hiyerarshi_Proces.doc+&cd=3&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 23.12.2018.
- [48]. <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:2kUkSVOagROJ:https://en.wikipedia.org/wiki/Bayraktar>

- _Tactical_UAS+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 07.01.2019.
- [49].https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:T9jga0Qp4RMJ:https://en.wikipedia.org/wiki/Alenia_Aermacchi_Sky-Y+&cd=2&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 07.01.2019.
- [50].http://pages.mscsoftware.com/rs/mscsoftware/images/aleniaaeronautica_october6%5B1%5D.pdf Erişim tarihi: 07.01.2019.
- [51].http://pages.mscsoftware.com/rs/mscsoftware/images/aleniaaeronautica_october6%5B1%5D.pdf Erişim tarihi: 07.01.2019.
- [52].https://umsskeldar.aero/wpcontent/uploads/UMS_SKELDAR_F-720.pdf Erişim tarihi: 07.01.2019.
- [53].<https://www.globalsecurity.org/military/world/russia/dozor.htm> Erişim tarihi: 07.01.2019.
- [54].<https://www.strategypage.com/htm/w/htairfo/articles/20090913.aspx> Erişim tarihi: 07.01.2019.
- [55].<https://www.airforce-technology.com/projects/yabhon-smart-eye-unmanned-aerial-vehicle-uav/> Erişim tarihi: 07.01.2019.
- [56].https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:v3ShtWEoijcJ:https://en.wikipedia.org/wiki/Guizhou_Soar_Dragon+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 07.01.2019.
- [57].https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:v3ShtWEoijcJ:https://en.wikipedia.org/wiki/Guizhou_Soar_Dragon+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 07.01.2019.
- [58].<https://www.defenceaviation.com/2013/01/guizhou-soar-eagle.html> Erişim tarihi: 07.01.2019.
- [59].<https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:tGUO-Abiw-wJ:https://en.wikipedia.org/wiki/HCUAV+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr> Erişim tarihi: 07.01.2019.
- [60].<https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Bd4xWo3AScQJ:https://en.wikipedia.org/wiki/Ababil+&cd=6&hl=tr&ct=clnk&gl=tr> Erişim tarihi: 07.01.2019.
- [61].<https://indopakdef.wordpress.com/2009/07/28/eads-defence-security-tests-the-largest-unmanned-aerial-system-uav-ever-built-in-europe/> Erişim tarihi: 07.01.2019.
- [62].https://en.wikipedia.org/wiki/Medium-altitude_long-endurance_unmanned_aerial_vehicle Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [63].https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:7dRcarhnNV8J:https://en.wikipedia.org/wiki/IAI_Heron+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [64].https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.asp?aircraft_id=1673 Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [65].https://www.youtube.com/watch?v=Oo_11ZkAVS4 Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [66].<http://www.airkule.com/yazar/NORTHROP-GRUMMAN-X-47B/1182/> Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [67].https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Q954ddTdA2UJ:https://en.wikipedia.org/wiki/Northrop_Grumman_X-47B+&cd=3&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [68].O'Gorman, Rob, and Chris Abbott. "Remote control war."(2013).
<https://www.files.ethz.ch/isn/170021/Remote-Control-War.pdf> Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [69].http://www.iai.co.il/2013/18900-37204-en/BusinessAreas_UnmannedAirSystems_HeronFamily.aspx Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [70].http://www.iai.co.il/Sip_Storage/FILES/8/42458.pdf Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [71].https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:1proqLE7jI8J:https://en.wikipedia.org/wiki/IAI_Eitan+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [72].https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:KwaPm4zYuxsJ:https://en.wikipedia.org/wiki/Mikoyan_Skat+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [73].<http://foreignpolicy.com/2013/06/03/meet-skat-russias-stealthy-drone/> Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [74].https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.asp?aircraft_id=909 Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [75].<https://ebooks.wtbooks.com/static/wtbooks/ebooks/9781283497367/9781283497367.pdf> Erişim Tarihi: 30.09.2018
- [76].<https://www.airforce-technology.com/projects/x-45-ucav/> Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [77].http://www.aiad.it/aiad_res/cms/documents/FalcoEVO_Salex2013.pdf Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [78].<http://www.leonardocompany.com/en/-falco-un-peacekeeping> Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [79].https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:AvA2gXAhLLcJ:https://en.wikipedia.org/wiki/DRDO_Rustom+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [80].https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:XyoulGy2WY4J:https://en.wikipedia.org/wiki/Medium-altitude_long-endurance_unmanned_aerial_vehicle+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [81].https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:arEWjWn9CnMJ:https://tr.wikipedia.org/wiki/Bayraktar_Taktik_%25C4%25B0nsans%25C4%25B1z_Hava_Arac%25C4%25B1+&cd=8&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [82].https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:2kUkSV0agR0J:https://en.wikipedia.org/wiki/Bayraktar_Tactical_UAS+&cd=7&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [83].https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:ztuJgG4o2RAJ:https://en.wikipedia.org/wiki/TAI_Anka+&cd=3&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [84].https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:ztuJgG4o2RAJ:https://en.wikipedia.org/wiki/TAI_Anka+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [85].<http://www.bilgiustan.com/yerli-ih-sistemleri-mill-insansiz-hava-araclari/> Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [86].<https://tyrannosurusrex.wordpress.com/2016/06/16/vestel-karayel-hedefleri-basariyla-vurdu/> Erişim tarihi: 08.01.2019.
- [87].<https://militaryedge.org/armaments/karayel/> Erişim tarihi: 08.01.2019.



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Preparation of chitosan and glycol chitosan coated magnetic nanoparticles loaded with carboplatin as anticancer drug

Antikanser ilaç olarak karboplatin yüklenmiş kitosan ve glikol kitosan kaplı manyetik nanotaneçiklerin hazırlanması

Yazar(lar) (Author(s)): Ceren ATİLA DİNÇER¹, Ali Mert ERDEK², Ayşe KARAKEÇİLİ³, Nuray YILDIZ⁴

ORCID¹: 0000-0003-0749-953X

ORCID²: 0000-0003-3142-3666

ORCID³: 0000-0002-8857-4927

ORCID⁴: 0000-0003-2428-3474

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Atila Dinçer C., Erdek A. M., Karakeçili A. and Yıldız N., "Preparation of chitosan and glycol chitosan coated magnetic nanoparticles loaded with carboplatin as anticancer drug", *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1017-1022, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.501694

Preparation of Chitosan and Glycol Chitosan Coated Magnetic Nanoparticles Loaded with Carboplatin as Anticancer Drug

Araştırma Makalesi / Research Article

Ceren ATİLA DİNÇER*, Ali Mert ERDEK, Ayşe KARAKEÇİLİ, Nuray YILDIZ

Department of Chemical Engineering, Ankara University, 06100 Tandoğan, Ankara, Turkey

(Geliş/Received : 24.12.2018 ; Kabul/Accepted : 31.01.2019)

ABSTRACT

Surface modified Fe₃O₄ nanoparticles (Fe₃O₄-OA) with an average diameter of 10 nm were synthesized, coated by chitosan (CS) and **glycol chitosan** (GCS), thus magnetic polymer nanocomposites were obtained. The magnetic nanostructures were analyzed by transmission electron microscopy (TEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-Ray diffraction (XRD) and vibrating sample magnetometer (VSM). All magnetic structures synthesized in this study exhibited superparamagnetic properties. Loading carboplatin (CpT) as anticancer drug to Fe₃O₄-OA-GCS nanocomposites were carried out with 13.17 % drug content and 38 % encapsulation efficiency. The cytotoxicity studies were ocured by MTT (3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide) assay on L929 mouse fibroblasts and MCF-7 human breast cancer cells. Fe₃O₄-OA-GCS-CpT nanocomposites showed higher cytotoxicity than free CpT on the MCF-7 cells at 50 µg/ml drug concentrations during 72 h.

Keywords: Fe₃O₄-OA nanoparticles, chitosan / glycol chitosan coating, carboplatin, anticancer drug loading, drug release.

Antikanser İlaç Olarak Karboplatin Yüklenmiş Kitosan ve Glikol Kitosan Kaplı Manyetik Nanotaneciklerin Hazırlanması

ÖZ

Yüzeyi modifiye Fe₃O₄ nanotanecikleri (Fe₃O₄-OA) ortalama 10 nm çapta sentezlenmiş, kitosan (CS) ve glikol kitosan (GCS) ile kaplanmışlardır, böylece manyetik polimer nanokompozitleri elde edilmiştir. Manyetik nano yapılar geçirimli elektron mikroskopu (TEM), Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi (FTIR), X-ışınları kırınımı (XRD) ve titreşimli örnek magnetometresi (VSM) ile analiz edilmiştir. Bu çalışmada sentezlenmiş tüm manyetik yapılar süperparamanyetik özellik göstermiştir. Fe₃O₄-OA-GCS nanokompozitleri üzerine antikanser ilaç karboplatinin (CpT) yüklenmesi % 13.17 ilaç içeriği ve % 38 enkapsülasyon etkinliği ile gerçekleştirilmiştir. Sitotoksitesite çalışmaları MTT (3-(4,5-dimetiltiazol-2-ol)-2,5-difeniltetrazolyum bromit) analiziyle L929 fare fibroblast ve MCF-7 insan meme kanseri hücreleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Fe₃O₄-OA-GCS-CpT nanokompozitleri MCF-7 hücreleri üzerinde 72 saat boyunca 50 µg/ml derişimde serbest CpT'den daha yüksek sitotoksitesite göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Fe₃O₄-OA nanotanecikler, kitosan / glikol kitosan kaplama, karboplatin, antikanser ilaç yükleme, ilaç salım.

1. INTRODUCTION

Magnetic nanoparticles with small dimensions and superparamagnetic properties (after eliminating magnetic field there is no permanent magnetization, no coercivity) are important functional structures for hyperthermia, magnetic resonance imaging (MRI), biochemistry, drug and gene delivery [1-4]. They have high surface energy due to high surface to volume ratio and tend to agglomeration to reduce this energy. Fe₃O₄ nanoparticles, which are widely used in bioapplications, are formed composites with different substances such as organic and inorganic materials in order to increase their biocompatibility and stability [5,6]. Chitosan used to coat iron oxides is a natural polymer provided by

deacetylation of chitin detected in the skeleton of crustaceans such as shrimp and crab. Deacetylation degree (DD) affects properties of chitosan such as solubility. Chitosan, a cationic polysaccharide can be used in biomedical applications due to its biocompatibility and nontoxicity [7-10]. Glycol chitosan decorated with ethylene glycol groups is a water soluble derivative of chitosan [11]. As an anticancer drug "carboplatin (CpT)" (cis-diamine (1,1-cyclobutanedicarboxylato)-platinum (II)) is similar to cisplatin with lower side effects. It plays an effective role during treatments of testicular, breast, ovarian, bladder, head, neck and lung cancers [12,13]. In the literature, studies were found about drug loaded chitosan or its derivatives with or without magnetic nanoparticles. Yang et al. (2018) [14] loaded paclitaxel (PTX) to estrone-modified glycol chitosan nanoparticles

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : catila@eng.ankara.edu.tr

(PTX/GCNP-ES) and realized cell culture studies on MCF-7 cells. They found the highest tumor inhibition ratio as 81.4 % with PTX/GCNP-ES structures. Zamora-Mora et al. (2017) [15] synthesized 5-fluorouracil loaded magnetic chitosan nanoparticles for drug delivery and magnetic hyperthermia (MH) therapy. Encapsulation and loading efficiency of nanoparticles were 80-82 % and 33-35 %, respectively. Folic acid functionalized magnetic (Fe_3O_4) chitosan nanocapsules were prepared by Zhong et al. (2017) [16] for the purpose of targeted delivery and release of coumarin 6. In the size range of 200-350 nm and superparamagnetic nanoparticles were synthesized and used for drug loading studies.

In the present work, synthesis of superparamagnetic Fe_3O_4 nanoparticles and surface modification with oleic acid (OA) were performed to increase coating efficiency and obtain stable nanostructures. Surface modified magnetic nanoparticles were coated with chitosan (CS) and glycol chitosan (GCS) which are natural polymers. Carboplatin used as anticancer drug was loaded to Fe_3O_4 -OA-GCS nanocomposites and drug release studies were carried out. To our knowledge, there is no study in the literature loading and release studies of carboplatin to Fe_3O_4 -OA-GCS nanocomposites. Cell culture studies were realized to determine cytotoxic properties of Fe_3O_4 -OA-GCS-CpT compared to CpT and Fe_3O_4 -OA-GCS structures.

2. MATERIALS and METHOD

2.1 Materials

Iron (II) chloride tetrahydrate ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 99 %, Sigma Aldrich), iron (III) chloride hexahydrate ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, % 97, Sigma Aldrich), sodium hydroxide (NaOH, ≥ 98 %, Sigma Aldrich), hydrochloric acid (HCl, 37 %, Sigma), oleic acid (OA, Alfa Aesar, 90 %), chitosan (Aldrich, medium molecular weight, 75-85 %), glycol chitosan (Sigma Aldrich, > 60 %), tripolyphosphate (TPP, Sigma-Aldrich 90-95 %), tween 80 (Merck), carboplatin (Sigma) and phosphate buffered saline (PBS, Sigma) were used for synthesis of magnetic nanostructures and drug loading studies. The materials of cytotoxicity studies purchased from Sigma-Aldrich were Dulbecco's modified Eagle's medium (DMEM), trypsin-EDTA, fetal bovine serum (FBS), and penicillin-streptomycin and 3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyl tetrazolium bromide (MTT), respectively.

2.2 Preparation and Surface Modification of Magnetic Nanoparticles (Fe_3O_4 / Fe_3O_4 -OA)

Magnetic Fe_3O_4 nanoparticles were synthesized similar to our previous work by co-precipitation of $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ and $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ salts [17]. The experiments carried out under nitrogen were realized at constant ratio of iron salts ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}=0.5$) and 80 °C. In the modification process by OA, oleic acid (30 ml) was added to Fe_3O_4 (0.5 g) nanoparticles and the mixture was stirred at 150 rpm for 90 minutes. The Fe_3O_4 -OA nanoparticles were separated

by a magnet and washed with acetone (x3) and dried by nitrogen [18].

2.3 Preparation of Chitosan / Glycol Chitosan Coated Magnetic Nanoparticles (Fe_3O_4 -OA-CS / Fe_3O_4 -OA-GCS)

The polymer coating of the magnetic nanoparticles was carried out by mixing and modifying of the methods in the literature [19-21]. 0.5 % (v/v) Tween 80 was added to the CS (or GCS) solution (2 mg / ml) in 1 % acetic acid and formed solution was mixed. Fe_3O_4 - OA nanostructures were placed in the polymer solution adjusted to pH 4.6 with 10 M NaOH (polymer / Fe_3O_4 - OA w:w 4:1). The TPP solution (crosslinker, 1.5 mg / ml) was dropped (10-15 min) to the magnetic polymer solution, stirring was continued at 300 rpm (15-20 min) as the dropping was completed (polymer / TPP w: w 4: 1). The nanostructures were separated by centrifugation (wash with x 3 DI) and the lyophilized samples were stored at + 4 °C.

2.4 Characterization

The characterization of magnetic nanostructures were realized by transmission electron microscopy (TEM, FEI Tecnai G2), Fourier-transformed infrared spectroscopy (FTIR, 8400 S Shimadzu) with spectra in the range of 4000-500 cm^{-1} and X-Ray diffraction (XRD, Rigaku Ultima-IV) using a scanning rate 2°/min. The magnetic properties of nanoparticles were determined by vibrating sample magnetometer (VSM, Cryogenic Limited PPMS).

2.5 Anticancer Drug Loading and Release Studies

The drug loaded magnetic polymer nanoparticles were synthesized according to the polymer coating method given in section 2.3. The anticancer drug carboplatin (10 mg) was completely dissolved in the polymer solution. The other stages of the synthesis method were the same. The drug loading and encapsulation efficiency were calculated from following equations given in our previous study [22]. Fe_3O_4 -OA-GCS-CpT drug-loaded nanocomposites were weighed after lyophilization and the value was used for drug loading calculations.

Drug loading (%)

$$= \frac{\text{weight of drug in nanocomposite}}{\text{weight of } \text{Fe}_3\text{O}_4\text{-OA-GCS-drug nanocomposite}} \times 100 \quad (1)$$

Encapsulation efficiency (%)

$$= \frac{\text{weight of drug in nanocomposite}}{\text{weight of initial amount of drug}} \times 100 \quad (2)$$

The drug release studies were realized from Fe_3O_4 -OA-GCS magnetic nanoparticles. 10 mg lyophilized drug loaded magnetic nanoparticles were dispersed in PBS solutions (1.5 ml) at different pH values (7.4 and 5.5) containing 1 % (w/v) Tween 80. The suspensions were shaken in an orbital shaker at 150 rpm and 37 °C. All of the mixtures were centrifuged at specified time intervals and the supernatants were replaced with fresh PBS (1.5

ml). HPLC analyses were used to evaluate drug loading and release efficiency of the Fe_3O_4 -OA-GCS magnetic nanoparticles. Analysis using Inertsil ODS-3 column with particle size $5\ \mu\text{m}$ ($250 \times 4.6\ \text{mm}$) were realized at 233 nm. The flow rate of mobile phase consisted of acetonitrile / water (10:90 v/v) was 1 ml/min. Column temperature and injection volume were adjusted as $25\ ^\circ\text{C}$ and $20\ \mu\text{L}$, respectively [13].

2.6 Cytotoxicity Studies

In vitro cytotoxicity assays with MTT (3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyl tetrazolium bromide) were performed using L929 mouse fibroblasts and MCF-7 human breast cancer cells. The culturing of the cells was carried out in a CO_2 (5 %) incubator at $37\ ^\circ\text{C}$ in DMEM medium containing 10 % fetal bovine serum (FBS) and 1 % penicillin streptomycin. In the cell culture studies, 4 different groups were used: TCPS (tissue culture polystyrene, control), Cpt, Fe_3O_4 -OA-GCS and Fe_3O_4 -OA-GCS-CPT nanocomposites. TCPS contained only cells and culture medium to determine the effect of the drug and nanoparticles on the cells comparatively. L929 and MCF-7 cells were allowed to reach confluency in 24-well cell culture plates. The culture mediums were replaced with the groups at $50\ \mu\text{g} / \text{ml}$ concentration to observe 24, 48 and 72 h cell viability. MTT added cells were incubated for 3 hours and after removing the solution, isopropanol: HCl (0.1 N) solution was placed to dissolve the formed formazan crystals for 1 hour at $37\ ^\circ\text{C}$ [23]. At the end of this period, the absorbance value of the solutions measured via the ELISA microplate reader (Rayto, RT2100C) at 570 nm.

2.7 Statistical Analysis

Statistical analysis was realized by using the software GraphPad InStat, Version 3.10 according to one-way analysis of variance (ANOVA). P values less than 0.05 indicated statistical significance.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Characterization of The Magnetic Nanoparticles

TEM images of magnetic and magnetic polymeric nanoparticles are given in Figure 1. The average particle size of Fe_3O_4 (Figure 1a) and Fe_3O_4 -OA (Figure 1b) nanoparticles were found approximately 8 nm and 10 nm, respectively [24]. As seen from images, surface modification with OA reduced the agglomeration of Fe_3O_4 nanoparticles. It was proven clearly that the modified magnetic nanoparticles were coated with chitosan and glycol chitosan polymers (Figure 1c and 1d).

Figure 2 indicates XRD pattern of Fe_3O_4 , Fe_3O_4 -OA, Fe_3O_4 -OA-CS and Fe_3O_4 -OA-GCS nanoparticles. XRD characteristic peaks which belong to (220), (311), (400), (422), (511), (440), (622) crystal planes of synthesized Fe_3O_4 nanoparticles are shown in Figure 2a.

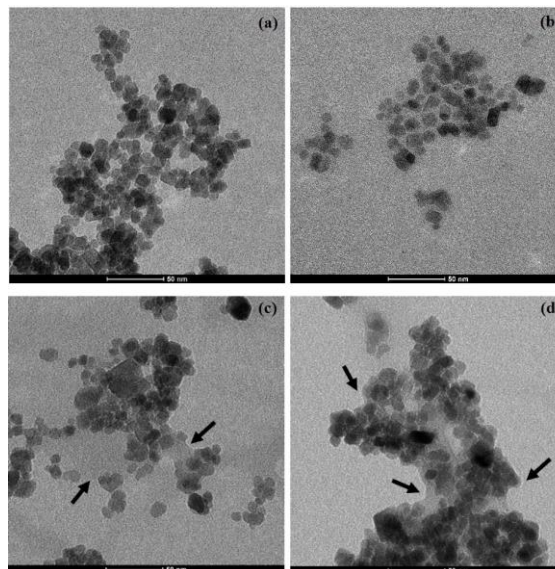


Figure 1. TEM images of (a) Fe_3O_4 (b) Fe_3O_4 -OA (c) Fe_3O_4 -OA-CS and (d) Fe_3O_4 -OA-GCS nanoparticles

The XRD analysis results showed no change in the crystal structure of Fe_3O_4 nanoparticles because of surface modification and polymer coating. The crystal diameters of synthesized nanostructures were calculated by Scherrer equation [25,26]. The results of Fe_3O_4 , Fe_3O_4 -OA, Fe_3O_4 -OA-CS and Fe_3O_4 -OA-GCS nanostructures were found as 4.6-19.2, 6.7-10.6, 8.0-19.3 and 6.6-10.6 nm, respectively.

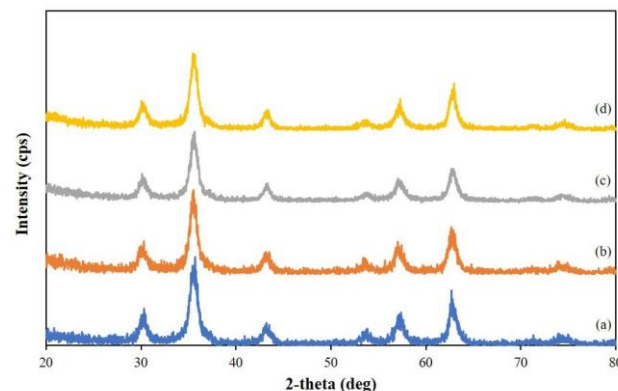


Figure 2. XRD pattern of (a) Fe_3O_4 and (b) Fe_3O_4 -OA nanoparticles, (c) Fe_3O_4 -OA-CS and (d) Fe_3O_4 -OA-GCS nanocomposites

When the FTIR spectrum of Fe_3O_4 nanoparticles was examined, it was found that the characteristic peaks at $578\ \text{cm}^{-1}$ and $3441\ \text{cm}^{-1}$ which belong to Fe-O and -OH (Figure 3a) [1,6]. The characteristic bands of oleic acid modified Fe_3O_4 nanoparticles were shown at 2924 and $2854\ \text{cm}^{-1}$ (CH_3 and CH_2 symmetrical and asymmetric stretching), 1635 and $1458\ \text{cm}^{-1}$ (COO- symmetric and asymmetric stretching), $1118\ \text{cm}^{-1}$ (O-C-O vibration), respectively (Figure 3b) [27]. In the spectrum shown in Figures 3c and 3d, the peaks seen in $3464\ \text{cm}^{-1}$ ($3441\ \text{cm}^{-1}$, O-H and N-H stretching vibration), $1658\ \text{cm}^{-1}$ (C=O stretching), $1535\ \text{cm}^{-1}$ ($1527\ \text{cm}^{-1}$, N-H bending

vibration), 1087 cm^{-1} (C-N vibration) proved that the oleic acid modified magnetic nanostructures were successfully coated with chitosan and glycol chitosan [27,28].

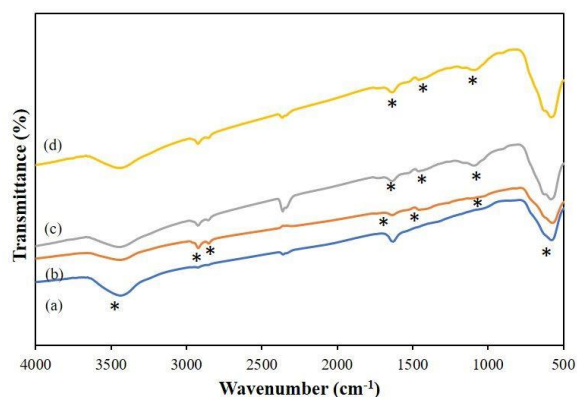


Figure 3. FTIR spectrum of (a) Fe_3O_4 and (b) Fe_3O_4 -OA nanoparticles, (c) Fe_3O_4 -OA-CS and (d) Fe_3O_4 -OA-GCS nanocomposites

VSM results with no coercivity showed that all magnetic structures synthesized in this study had superparamagnetic properties which desired in bioapplications. The saturation magnetization value of the Fe_3O_4 nanoparticles was determined as 54.4 emu/g . Due to surface modification and polymer coating, the saturation magnetizations of Fe_3O_4 -OA, Fe_3O_4 -OA-CS and Fe_3O_4 -OA-GCS decreased to 53, 46 and 48 emu/g , respectively.

3.2 Anticancer Drug Loading and Release Studies

It was concluded that the loading capacity of carboplatin on the Fe_3O_4 -OA-GCS nanocomposites was more effective by analyzing the synthesis fluids in drug loading studies. The drug release studies were carried out by using glycol chitosan coated magnetic nanoparticles. The results of TEM, XRD and VSM analyses of Fe_3O_4 -OA-GCS-CPt nanocomposites were given in Figure 4. The characteristic crystal structure of nanocomposites was preserved after anticancer drug loading (Figure 4b). The nanocomposites continued to show superparamagnetic properties, but saturation magnetizations (32.6 emu/g) reduced as expected (Figure 4c).

The drug content and encapsulation efficiency of Fe_3O_4 -OA-GCS-CPt nanocomposites were found 13.7% and 38% , respectively. Similar results were found in the literature [23]. The release of Cpt from magnetic structure was examined at pH 7.4 and 5.5 which given in Figure 5.

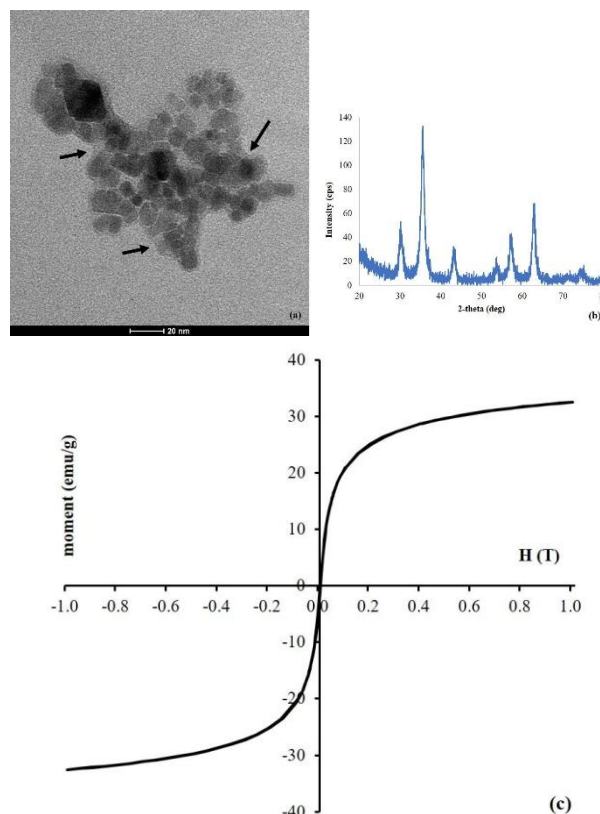


Figure 4. (a) TEM image (b) XRD pattern (c) VSM result of Fe_3O_4 -OA-GCS-CPt nanocomposites

The results of the "burst release" in the first 8 hours were about 13% at pH 7.4 and 5.5. After 48 h, cumulative release values of 15.04% and 15.63% were reached at different pH values. A slightly higher release value was reached at pH 5.5, which is important for cancerous areas. Carboplatin loading studies on Fe_3O_4 -OA-GCS nanocomposites have not been found in the literature until now.

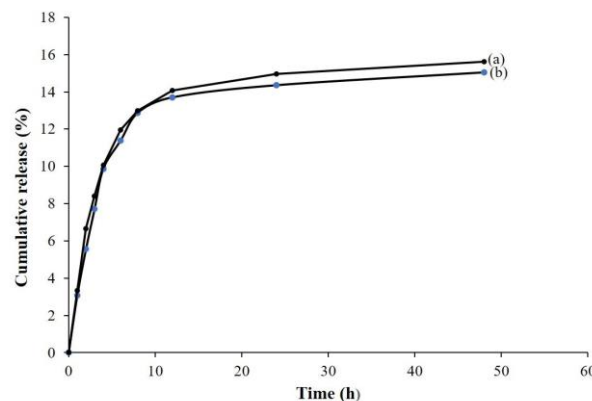


Figure 5. Cpt release profiles from Fe_3O_4 -OA-GCS nanocomposites (a) pH 5.5, (b) pH 7.4

3.3 Cytotoxicity Studies

The results of the cell culture studies performed with L929 mouse fibroblasts and MCF-7 human breast cancer cells at the end of 24, 48 and 72 h are given in Figure 6. Compared to the TCPS, it was determined that the different groups (CpT, Fe₃O₄-OA-GCS and Fe₃O₄-OA-GCS-CpT) had no remarkable toxic effect on L929 cells (Figure 6a).

Figure 6b indicates that the drug-loaded magnetic nanoparticles (Fe₃O₄-OA-GCS-CpT, P < 0.05) showed more toxic effects than free drug on the MCF-7 cancer cells. While the free drug is easily diffused from the cell membrane, the drug loaded nanostructures led to controlled release and high intracellular concentration. Mean values of cytotoxic effects of free CpT and Fe₃O₄-OA-GCS-CpT nanostructures with the same drug amount (50µg / ml) on MCF-7 cells were 6.73 % and 21.18 %. Fe₃O₄-OA-GCS nanostructures had no valid cytotoxic effect on the cancer cells according to the TCPS. When the viability of the cells were examined, it was found that the low concentration (50µg / ml) was not very effective on cell viability [23].

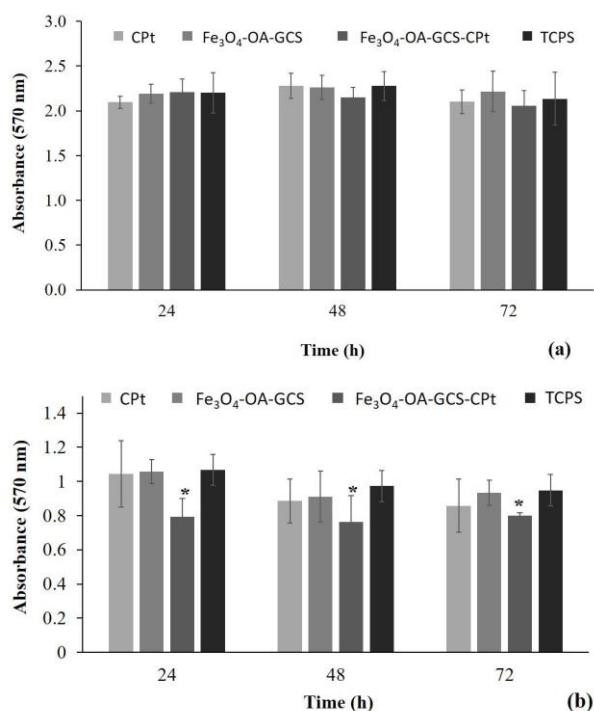


Figure 6. Cytotoxic effect of different groups on (a) L929 (b) MCF-7 cells (* P < 0.05)

4. CONCLUSION

Superparamagnetic Fe₃O₄ nanoparticles modified and coated by oleic acid (OA), chitosan (CS) and glycol chitosan (GCS). Fe₃O₄-OA-GCS nanocomposites were selected for carboplatin loading and the loading study was performed successfully with 13.17 % drug content and 38 % encapsulation efficiency. It was determined that the polymer coating and drug loading did not cause

any negative properties on the crystal structure and superparamagnetic property. Fe₃O₄-OA-GCS-CpT nanocomposites exhibited higher cytotoxic effect than CpT on the MCF-7 human breast cancer cells, which confirmed controlled release.

ACKNOWLEDGEMENTS

Ankara University Research Fund provided financial support to this study via BAP project with number 15B0443007. The authors are grateful to Doç. Dr. Demet Cansaran Duman from Ankara University Biotechnology Institute, Ankara, since politely granting of MCF-7 human breast cancer cells.

REFERENCES

- [1] Zhang, L., He, R. and Gu, H. C., "Oleic acid coating on the monodisperse magnetite nanoparticles", *Applied Surface Science*, 253: 2611-2617, (2006).
- [2] Lan, Q., Liu, C., Yang, F., Liu, S., Xu, J. and Sun, D., "Synthesis of bilayer oleic acid-coated Fe₃O₄ nanoparticles and their application in pH-responsive Pickering emulsions", *Journal of Colloid and Interface Science*, 310: 260-269, (2007).
- [3] Bagherpour, A. R., Kashanian, F., Ebrahimi, S. S. and Habibi-Rezaei, M., "L-arginine modified magnetic nanoparticles: green synthesis and characterization", *Nanotechnology*, 29: 075706, (2018).
- [4] Assa, F., Jafarizadeh-Malmiri, H., Ajamein, H., Vaghari, H., Anarjan, N., Ahmadi, O. and Berenjian, A., "Chitosan magnetic nanoparticles for drug delivery systems", *Critical Reviews in Biotechnology*, 37: 492-509, (2017).
- [5] Gupta, A. K. and Gupta, M., "Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications", *Biomaterials*, 26: 3995-4021, (2005).
- [6] Mahdavi, M., Ahmad, M. B., Haron, M. J., Namvar, F., Nadi, B., Rahman, M. Z. A. and Amin, J., "Synthesis, surface modification and characterisation of biocompatible magnetic iron oxide nanoparticles for biomedical applications", *Molecules*, 18: 7533-7548, (2013).
- [7] Agnihotri, S. A., Mallikarjuna, N. N. and Aminabhavi, T. M., "Recent advances on chitosan-based micro- and nanoparticles in drug delivery", *Journal of Controlled Release*, 100: 5-28, (2004).
- [8] Pillai, C. K. S., Paul, W. and Sharma, C. P., "Chitin and chitosan polymers: Chemistry, solubility and fiber formation", *Progress in Polymer Science*, 34: 641-678, (2009).
- [9] Park, J. H., Saravanakumar, G., Kim, K. and Kwon, I. C., "Targeted delivery of low molecular drugs using chitosan and its derivatives", *Advanced Drug Delivery Reviews*, 62: 28-41, (2010).
- [10] Li, P., Wang, Y., Peng, Z., She, F. and Kong, L., "Development of chitosan nanoparticles as drug delivery systems for 5-fluorouracil and leucovorin blends", *Carbohydrate Polymers*, 85: 698-704, (2011).

- [11] Trapani, A., Sitterberg, J., Bakowsky, U. and Kissel, T., "The potential of glycol chitosan nanoparticles as carrier for low water soluble drugs", *International Journal of Pharmaceutics*, 375: 97-106, (2009).
- [12] Nanjwade, B.K., Singh, J., Parikh, K.A. and Manvi, F.V., "Preparation and evaluation of carboplatin biodegradable polymeric nanoparticles", *International Journal of Pharmaceutics*, 385: 176-180, (2010).
- [13] Jose, S., Juna, B. C., Cinu, T. A., Jyoti, H., and Aleykutty, N. A., "Carboplatin loaded Surface modified PLGA nanoparticles: Optimization, characterization, and in vivo brain targeting studies", *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 142: 307-314, (2016).
- [14] Yang, H., Tang, C. and Yin, C., "Estrone-modified pH-sensitive glycol chitosan nanoparticles for drug delivery in breast cancer", *Acta Biomaterialia*, 73: 400-411, (2018).
- [15] Zamora-Mora, V., Fernández-Gutiérrez, M., González-Gómez, Á., Sanz, B., San Román, J., Goya, G.F., Hernández, R. and Mijangos, C., "Chitosan nanoparticles for combined drug delivery and magnetic hyperthermia: From preparation to in vitro studies", *Carbohydrate Polymers*, 157: 361-370, (2017).
- [16] Zhong, S., Zhang, H., Liu, Y., Wang, G., Shi, C., Li, Z., Feng, Y. and Cui, X., "Folic acid functionalized reduction-responsive magnetic chitosan nanocapsules for targeted delivery and triggered release of drugs", *Carbohydrate Polymers*, 168: 282-289, (2017).
- [17] Atila Dinçer, C., Yıldız, N., Aydoğan, N., and Çalıklı, A., "A comparative study of Fe₃O₄ nanoparticles modified with different silane compounds", *Applied Surface Science*, 318: 297-304, (2014).
- [18] Tansık, G., Yakar, A. and Gündüz, U., "Tailoring magnetic PLGA nanoparticles suitable for doxorubicin delivery", *Journal of Nanoparticle Research*, 16: 2171, (2014).
- [19] Tıgılı Aydın, R. S., and Pulat M., "5-Fluorouracil encapsulated chitosan nanoparticles for pH-stimulated drug delivery: evaluation of controlled release kinetics", *Journal of Nanomaterials*, 42: 1-10, (2012).
- [20] Gökçe Y., Cengiz B., Yıldız N., Çalıklı A., Aktaş Z., "Ultrasonication of chitosan nanoparticle suspension: Influence on particle size", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 462: 75-81, (2014).
- [21] Qin, H., Wang, C. M., Dong, Q. Q., Zhang, L., Zhang, X., Ma, Z. Y. and Han, Q. R., "Preparation and characterization of magnetic Fe₃O₄-chitosan nanoparticles loaded with isoniazid", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 381: 120-126, (2015).
- [22] Atila Dinçer, C., Yıldız N., Karakeçili A., Aydoğan N., and Çalıklı A., "Synthesis and characterization of Fe₃O₄-MPTMS-PLGA nanocomposites for anticancer drug loading and release studies", *Artificial Cells, Nanomedicine and Biotechnology*, 45: 1408-1414, (2017).
- [23] Khan, M. A., Zafaryab, M., Mehdi, S. H., Quadri, J. and Rizvi, M. M. A., "Characterization and carboplatin loaded chitosan nanoparticles for the chemotherapy against breast cancer in vitro studies", *International Journal of Biological Macromolecules*, 97: 115-122, (2017).
- [24] Gu, S., Onishi, J., Kobayashi, Y., Nagao, D. and Konno M., "Preparation and colloidal stability of monodisperse magnetic polymer particles", *Journal of Colloid and Interface Science*, 289: 419-26, (2005).
- [25] Wu, S., Sun, A., Zhai, F., Wang, J., Xu, W., Zhang, Q. and Volinsky, A. A., "Fe₃O₄ magnetic nanoparticles synthesis from tailings by ultrasonic chemical coprecipitation", *Materials Letters*, 65: 1882-1884, (2011).
- [26] Haldorai, Y., Pham, Q. L., and Shim, J. J., "Supercritical fluid mediated synthesis of poly (2-hydroxyethyl methacrylate)/Fe₃O₄ hybrid nanocomposite", *Materials Science and Engineering: B*, 176: 773-778, (2011).
- [27] Qu, J., Liu, G., Wang, Y. and Hong, R., "Preparation of Fe₃O₄-chitosan nanoparticles used for hyperthermia", *Advanced Powder Technology*, 21: 461-467, (2010).
- [28] Inbaraj, B. S., Tsai, T. Y. and Chen, B. H., "Synthesis, characterization and antibacterial activity of superparamagnetic nanoparticles modified with glycol chitosan", *Science and Technology of Advanced Materials*, 13: 015002, (2012).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Denge kontrol sisteminin LQR ile gerçek zamanlı durum geri beslemeli kontrolü

Real time full state feedback control of a seesaw system based on LQR

Yazar(lar) (Author(s)): Selçuk KIZIR

ORCID : 0000-0002-0582-5904

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kizir S., “Denge kontrol sisteminin LQR ile gerçek zamanlı durum geri beslemeli kontrolü”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1023-1030, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.461723

Denge Kontrol Sisteminin LQR ile Gerçek Zamanlı Durum Geri Beslemeli Kontrolü

Araştırma Makalesi / Research Article

Selçuk KİZİR*

Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.10.2016 ; Kabul/Accepted : 26.08.2017)

ÖZ

Bu çalışmada tahterevalli sistemi olarak da bilinen eksik tahrikli bir denge kontrol düzeneğinin doğrusal karesel regülatör (LQR) yöntemine dayanan durum geri besleme yöntemi ile kontrolüne yönelik deneysel sonuçlar sunulmuştur. Sistem ağırlık merkezinden sabitlenmiş ve serbestçe dönebilen iki koldan oluşmaktadır. İki kol arasında doğrusal bir ray ve ray üzerinde hareket edebilen bir araba ile denge kontrolü sağlanmaktadır. Önerilen sistem doğrusal olmayan ve kararsız bir yapı ihtiva ettiği için kontrol sistemleri dersleri ve laboratuvarlarında doğrusal olmayan sistemlerin analizinde eğitsel amaçlı olarak kullanılmaktadır. Sistemin matematiksel modeli verilmiş ve tam durum geri besleme yöntemi, Bryson kuralı ve doğrusal karesel regülatör ile gerçek zamanlı sistem üzerinde denge kontrolü başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan denetleyici ARM (Advanced RISC Machine) tabanlı bir geliştirme kiti üzerinde hızlı kontrol prototipleme yöntemi ile uygulanmıştır. Sisteme çeşitli bozucu etkiler uygulanmış ve denetleyicinin bu etkilerin üstesinden gelebildiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Denge kontrol sistemi, durum geri-besleme, gerçek zamanlı kontrol, bryson kuralı, doğrusal karesel regülatör.

Real Time Full State Feedback Control of a Seesaw System Based on LQR

ABSTRACT

In this study, experimental results for the control of the seesaw system which is an under-actuated system by the state feedback method using linear quadratic regulator (LQR) are presented. The system consists of two arms that are fixed from the center of gravity and turn freely. Balance control is provided by a linear rail between the two arms and a cart that can move on the rail. Since the proposed system contains a nonlinear and unstable structure, it is used for the educational purposes in the analysis of nonlinear systems in the control systems courses and laboratories. The mathematical model of the system is given and the balance control on the real-time system has been successfully accomplished by the full state feedback method using Bryson's rule and linear quadratic regulator. The designed controller is implemented by a rapid control prototyping method on an ARM (Advanced RISC Machine) based development kit. External disturbances were applied to the system in order to test the performance of the controller and it was observed that it was able to control the system under disturbances.

Keywords: Seesaw mechanism, state feedback, real time control, bryson's rule, linear quadratic regulator.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kontrol laboratuvarlarında sıklıkla kullanılan deney düzenekleri arasında yer alan ve eğitsel ve araştırma amaçlı kullanılan eksik tahrikli sistemlerden biri de denge kontrol sistemidir (DKS). Sistem tek girişli çok çıkışlı bir sistem olmakla birlikte doğrusal olmayan karakteristiği ve kararsız yapısı ile temel bir kontrol problemi olarak karşımıza çıkmaktadır [1-3].

Literatür incelendiğinde son 15-20 yıldır DKS ile ilgili araştırma ve eğitim amaçlı çalışmalara rastlanabilir. Lin vd. [1] eksik tahrikli denge kontrol sisteminin kontrolünün zor olduğunu vurguladıkları çalışmalarında elektrikli servo aktüatörler tarafından tahrik edilen ve aynı zamanda dengeleme metodolojisini geliştiren yenilikçi bir arabalı tahterevalli sistemi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu kapsamda, genetik algoritma (GA)

ile PID kontrol parametrelerinin optimizasyonu ve daha sonra doğrusal olmayan modeli dengelemek için GA ayarlama yaklaşımıyla uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemine (ANFIS) dayanan akıllı bulanık mantık denetleyicisi tasarlamışlardır. Sonuçlar, önerilen yeni araba tahterevalli sisteminin uygulanmasının, izleme ve dengeleme işleminde önceki pnömatis araba tahterevalli sisteminden daha iyi işlev gösterdiğini göstermektedir. Wu [4] çok değişkenli sistemlerin yarı-zamanlı optimal PID denetim problemini ele almış ve DKS üzerinden önerilen yöntemin performansı doğrulamıştır. Chung ve diğerleri [5], DKS'nin bulanık mantık+LQR tabanlı öğrenen bir hibrit denetim yapısına ait benzetim sonuçlarını vermişlerdir. Kararsız ve doğrusal olmayan DKS sistemi için önerdikleri yöntemin güçlü bir yöntem olduğunu ve sistem modelinin tam olarak bilinmesine gerek olmadığını vurgulamışlardır. Tsai ve arkadaşları [6], denge kontrol sisteminin yapay sinir ağları tabanlı kayma kipli kontrolüne yönelik

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : selcuk.kizir@kocaeli.edu.tr

deneysel sonuçlar sunmuşlardır. Önerdikleri denetim yapısını hiyerarşik bulanık mantık denetim yapısı ile karşılaştırmışlardır ve daha hızlı ve öğrenen bir denetim sistemi elde ettiklerini vurgulamışlardır. Lin ve diğerleri [7], pnömatik eyleyicili yeni bir DKS yapısı önermiş ve durum geri besleme yöntemi ile kontrol etmişlerdir.

DKS sistemi eğitim amacıyla da kullanılmaktadır [2, 8]. DKS sistemi kullanılarak yeni kontrol problemleri ya da laboratuvar ekipmanları geliştirebilmektedir. Lin ve arkadaşları [8] ters sarkaç ve DKS sistemini entegre ederek DKS üzerindeki ters sarkacın diklenme ve denge kontrolü üzerinde çalışmışlardır. Modelden bağımsız bulanık mantık tabanlı bir denetim yapısı sunmuşlardır.

Bu çalışmada üniversitelerimizde okutulmakta olan lisans ve lisansüstü kontrol derslerine yönelik düşük maliyetli bir DKS sisteminin geliştirilmesi, modellenmesi ve gerçek zamanlı hızlı kontrol prototipleme yöntemine göre durum geri beslemeli kontrolü ele alınmaktadır. Lagrange tabanlı DKS'nin modellenmesi 2. bölümde detaylarıyla verilmiş, 3. bölümde Bryson kuralı ve doğrusal karesel regülatör tabanlı tam durum geri besleme yöntemi kullanılarak gerçek zamanlı denetim yapısı verilmiş, deney düzeneği ve uygulama modelleri verilmiş, 4. bölümde ise çeşitli bozucu etkiler altında elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlar sunulmuştur.

2. SİSTEMİN MATEMATİKSEL MODELİ (MATHEMATICAL MODEL OF THE SYSTEM)

Dinamik bir sistemin hareket denklemlerini türetmek için, Newton kanunları, D'Alembert's prensibi, Euler-Lagrange denklemleri ve Hamilton's prensibi gibi farklı yöntemler kullanılabilir. Sonuç olarak, hepsi eşdeğer denklem kümeleri sağlar, ancak matematiksel tanımlamaları, hesaplamaya uygun olmaları ve temel mekanik problemle ilgili fikir verme yeteneklerine göre farklılık gösterir. Newton yasaları nesnelerin hareketlerini tanımlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Newton yasalarını kullanabilmek için tüm yönlerdeki ivmeleri yani ikinci dereceden türevleri hesaplamak gerekirken enerji tabanlı yöntemlerde değişkenlerin birinci dereceden türevlerini yani yalnızca hızlarını hesaplamak yeterli olmaktadır. Dolayısı ile enerji tabanlı yöntemleri kullanmanın kompleks sistemler için daha kolay çözümler sunduğu söylenebilir. DKS'nin matematiksel modelinin çıkartılmasında enerji tabanlı Lagrange yaklaşımı kullanılmıştır. Lagrangian mekaniği, İtalyan-Fransız matematikçi ve gökbilimci Joseph-Louis Lagrange tarafından klasik mekaniğin yeniden yapılandırılması ile 1788'de tanıtılmış bir yöntemdir. Buna göre öncelikle konum ve hız denklemlerinin yazılarak sistemin toplam kinetik ve potansiyel enerjilerinin hesaplanması gerekmektedir. Sistemin geliştirilmesinde ve modellenmesinde [2] nolu çalışmadan yola çıkılmıştır.

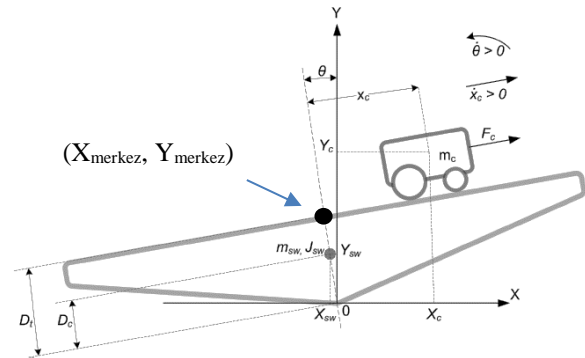
Denge kontrol sisteminin hareket denklemlerinin bulunması için Denklem (1)'de verilen Lagrange yöntemi kullanılmıştır.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Burada, q_i sistem genelleştirilmiş koordinatı, \dot{q}_i genelleştirilmiş koordinatın zamana göre birinci türevi, τ_i i. değişkene hareket vermek için sistemin i. değişkenine uygulanan genelleştirilmiş tork ve L Lagrangian terimini ifade etmektedir. Lagrangian eşitliğinden,

$$L = \sum KE - \sum PE \quad (2)$$

Sistemin, araba konumu (x_c) ve tahterevallinin referans düzleme göre açılma konumu (θ) olmak üzere toplam iki çıkış değişkeni vardır. Şekil 1'deki serbest cisim diyagramından görüldüğü üzere x_c 'nin pozitif yönü sağa, θ 'nın pozitif yönü ise saat yönünün tersine doğrudur. Çizelge 1'de DKS'ne ait sistem parametreleri verilmiştir. Burada, m_{sw} iki kollu denge mekanizmasının kütle, m_c hareketli aracın kütlesi, D_c ağırlık merkezinin pivot noktasına olan uzaklığı, D_t aracın hareket ettiği düzlemin pivot noktasına olan uzaklığı, J_{sw} ve J_m denge mekanizması ve arabanın ataletini, B_{eq} ve B_{sw} denge mekanizması ve arabanın sürtünme katsayısını ve g yer çekimi ivmesini temsil etmektedir.



Şekil 1. DKS serbest cisim diyagramı [2] (Free body diagram of the seesaw mechanism)

Çizelge 1. Sistem parametreleri (System parameters)

| | | |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| $m_{sw} = 5 \text{ kg}$ | $J_{sw} = 0.395 \text{ Nms}^2$ | $B_{eq} = 4.3 \text{ Ns/m}$ |
| $m_c = 0.66 \text{ kg}$ | $J_m = 0$ | $B_{sw} = 0$ |
| $D_c = 0.075 \text{ m}$ | $D_t = 0.16 \text{ m}$ | $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ |

DKS'nin koordinat sistemi üzerindeki konumu uzunluk ve açı cinsinden ifade edilir. Salıncak sisteminin yatay ve dikey eksenlerdeki konumu Denklem (3)'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} X_{sw} &= -D_c \sin \theta \\ Y_{sw} &= D_c \cos \theta \end{aligned} \quad (3)$$

Arabanın konumu, sistemin merkezine göre referans alınarak belirlenmektedir. DKS merkez konum denklemleri Denklem (4)'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} X_{merkez} &= -D_t \sin \theta \\ Y_{merkez} &= D_t \cos \theta \end{aligned} \quad (4)$$

Araba konum denklemleri, sistemin merkez konumuna bağlı olarak Denklem (5)'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} X_c &= -D_t \sin \theta + x_c \cos \theta \\ Y_c &= D_t \cos \theta + x_c \sin \theta \end{aligned} \quad (5)$$

Arabanın hız denklemleri konum denklemlerinin türevi alınarak Denklem (6)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{X}_c &= -D_t \dot{\theta} \cos \theta + \dot{x}_c \cos \theta - x_c \dot{\theta} \sin \theta \\ \dot{Y}_c &= -D_t \dot{\theta} \sin \theta + \dot{x}_c \sin \theta + x_c \dot{\theta} \cos \theta\end{aligned}\quad (6)$$

Sistemdeki toplam kinetik enerjiyi arabanın ve denge kolunun kinetik enerjileri oluşturur. Denge kolunun hareketinden dolayı sadece dönme kinetik enerjisi vardır. Arabanın yatay ekseninde lineer hareket etmesinden dolayı ve dönmeden dolayı oluşan kinetik enerjisi vardır. Denge kolunun ve arabanın kinetik enerjileri:

$$\begin{aligned}K_{sw} &= \frac{1}{2} J_{sw} \dot{\theta}^2 \\ K_c &= \frac{1}{2} \frac{J_m K_g^2 x_c^2}{r_m^2} + \frac{1}{2} m_c [D_t^2 \dot{\theta}^2 - 2D_t \dot{\theta} \dot{x}_c + \dot{x}_c^2 + x_c^2 \dot{\theta}^2]\end{aligned}\quad (7)$$

Denge kolunun ve arabanın potansiyel enerjisi:

$$\begin{aligned}P_{sw} &= m_{sw} g D_c \cos \theta \\ P_c &= m_c g (D_t \cos \theta + x_c \sin \theta)\end{aligned}\quad (8)$$

elde edilir. Sistemin genelleştirilmiş koordinatı (mafsal değişkenleri) ve genelleştirilmiş tork vektörü ise; DKS genelleştirilmiş koordinatı: $q = [x_c \ \theta]$ ve DKS genelleştirilmiş tork vektörü: $\tau = [\tau_1 \ 0]$ 'dir.

Belirlenen her bir sistem değişkeni için Denklem (2) eşitliği uygulanır. Her bir değişken için bu eşitliğin uygulanması sonucu doğrusal olmayan iki denklem elde edilir. Bu denklemler sistemin dinamiğini veren diferansiyel denklemlerdir.

İlk olarak x_c durum değişkeni eşitliğe uygulanırsa Denklem (9)'daki ifade elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_c} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial x_c} \right) = F_c - B_{eq} \dot{x}_c \quad (9)$$

L yerine yazılıp, denklem düzenlenirse:

$$m_c \ddot{x}_c - m_c D_t \ddot{\theta} - m_c x_c \dot{\theta}^2 + m_c g \sin \theta = F_c - B_{eq} \dot{x}_c \quad (10)$$

θ durum değişkeni için (2) eşitliği uygulandığında Denklem (11)'deki ifade elde edilir.

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \right) &= -B_{sw} \dot{\theta} \\ m_c x_c^2 \ddot{\theta} + 2m_c x_c \dot{x}_c \dot{\theta} + g m_c x_c \cos \theta - m_c D_t \ddot{x}_c \\ &+ (J_{sw} + m_c D_t^2) \ddot{\theta} - m_c g D_t \sin \theta \\ &- m_{sw} g D_c \sin \theta = -B_{sw} \dot{\theta}\end{aligned}\quad (11)$$

Sistemi tanımlayan denklemlerin doğrusal olmadıkları görülmektedir ve bu sebeple analiz, benzetim ve denetleyici tasarımının yapılabilmesi için denklemlerin doğrusallaştırılmaları gerekmektedir. Sistem araba

konumunun merkezde olduğu ve sistemin yatay eksenle paralel olduğu durumda kararsız denge noktası civarında kontrol edilmektedir. Doğrusallaştırma yüksek dereceli terimleri ihmal edilerek Taylor serisi açılımı ile yapılabilir.

$$\begin{aligned}\theta &= \theta_0 + \varepsilon \\ \dot{\theta} &= \dot{\varepsilon} \\ \varepsilon^2 &\approx 0\end{aligned}\quad (12)$$

$$f(\theta) \cong f(\theta_0) + \left. \frac{\partial f(\theta)}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_0} (\theta - \theta_0)$$

$\theta=0$ için birinci dereceden Taylor serisi açılımı:

$$\begin{aligned}\cos \theta &\approx \cos(0) - \theta \sin(0) = 1 \\ \sin \theta &\approx \sin(0) + \theta \cos(0) = \theta\end{aligned}\quad (13)$$

Denklem 10 ve 11 ile verilen doğrusal olmayan hareket denklemlerindeki doğrusal olmayan terimler yerine koyulup, küçük değişimler için, $x_c^2 = 0$, $\dot{\theta}^2 = 0$, $x_c \dot{\theta} = 0$ alınarak sadeleşme yapılırsa,

$$\begin{aligned}m_c \ddot{x}_c - m_c D_t \ddot{\theta} + m_c g \theta &= F_c - B_{eq} \dot{x}_c \\ g m_c x_c - m_c D_t \ddot{x}_c + (J_{sw} + m_c D_t^2) \ddot{\theta} - m_c g D_t \theta - \\ m_{sw} g D_c \theta &= -B_{sw} \dot{\theta}\end{aligned}\quad (14)$$

elde edilir ve buradan durum denklemleri aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\ddot{x}_c = \frac{1}{(J_{sw})} \begin{bmatrix} (-m_c D_t g) x_c + \left(-D_t^2 B_{eq} - \frac{B_{eq} J_{sw}}{m_c} \right) \dot{x}_c \\ + D_t g m_{sw} D_c \theta + F_c \left(D_t^2 + \frac{J_{sw}}{m_c} \right) \\ - g J_{sw} \theta - D_t B_{sw} \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{(J_{sw})} [-g m_c x_c + D_t (F_c - B_{eq} \dot{x}_c) + m_{sw} g D_c \theta - B_{sw} \dot{\theta}]$$

Sistemin durum değişkenleri araba konumu, araba hızı, denge kolunun açısal konumu ve hızıdır. Çıkış değişkenleri ise araba konumu ve denge kolunun açısal konumudur. Bu değişkenler Denklem (16)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ x &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ \theta \\ \dot{x}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (16)$$

$$y = [x_c \ \theta]$$

Sistemin durum uzayı modeli Denklem (17)'de görüldüğü şekilde elde edilmiştir [2].

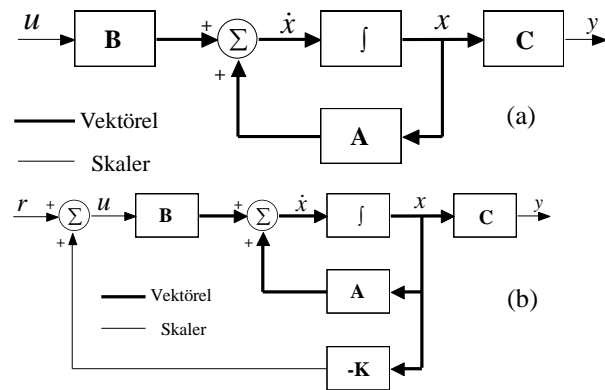
$$\begin{aligned}A &= \frac{1}{J_{sw}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -m_c D_t g & -g J_{sw} + D_t g m_{sw} D_c & \frac{-m_c D_t^2 B_{eq} - B_{eq} J_{sw}}{m_c} & -D_t B_{sw} \\ -g m_c & g m_{sw} D_c & -D_t B_{eq} & -B_{sw} \end{bmatrix} \\ B &= \frac{1}{J_{sw}} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_c \\ D_t \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (17)$$

3. SİSTEMİN DENETİMİ VE DENEYSSEL DÜZENİN OLUŞTURULMASI (CONTROL OF THE SYSTEM AND EXPERIMENTAL SETUP)

Denklem 16 ile verilen durum uzayı modelinin blok diyagramı Şekil 2.a'da gösterilmektedir. Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde çıkış toplama fonksiyonuna uygulanırken tam durum geri besleme yönteminde ise durumlar geri beslenir. Her durum değişkeni bir $-K_i$ kazancı ile çarpılarak kontrol sinyali elde edilir. Arzu edilen kapalı çevrim kontrol performansı için kutuplar kazançların seçilmesiyle istenilen bir yere atanabilir. A matrisinin öz değerleri ile belirlenen sistem kutupları, artık A-BK matrisinin öz değerleri ile belirlenmektedir [9] (Denklem 18).

$$\dot{x} = Ax + Bu = Ax + B(-Kx + r) = (A - BK)x + Br$$

$$y = Cx \quad (18)$$



Şekil 2. (a) Sistemin durum uzayı blok diyagramı (b) durum geri beslemeli sistem (a) State-space block diagram of the system (b) state feedback system)

Teorik olarak, birçok sistem için uygun kazanç matrisi ile sistem kutup noktaları istenilen herhangi bir yere yerleştirilebilir. Bu yöntemi kullanarak hızlı ve kararlı sistem cevabı elde edilebilir. Ancak, gerçek performans fiziksel donanımla sınırlıdır. En iyi sonuçlar, cevap hızı ve kontrol eforu arasında optimizasyon yapılarak ulaşılabılır. Bu doğrusal-karesel-regülatör (linear quadratic regulator - LQR) yöntemi kullanılarak yapılabilir. LQR, Denklem (19) ile verilen maliyet fonksiyonunu en aza indiren optimal kontrol probleminin özel bir halidir [9].

$$J = \int_0^{\infty} [x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)] dt \quad (19)$$

Durum geri beslemeli denetleyici tasarımında asıl amaç gerçek kısıtlar altında K kazanç matrisinin bulunmasıdır. Literatürde "Bryson's Rule" [10, 11] olarak adlandırılan yöntemle başlamak bu amaç doğrultusunda kullanılabilir. Bu yöntemde K kazanç matrisinin bağlı olduğu Q ve R parametreleri, Denklem (20)'de verilen ifadelerle seçilebilir. (Q pozitif yarı - tanımlı bir matristir, R ise pozitif sabit bir sayıdır.)

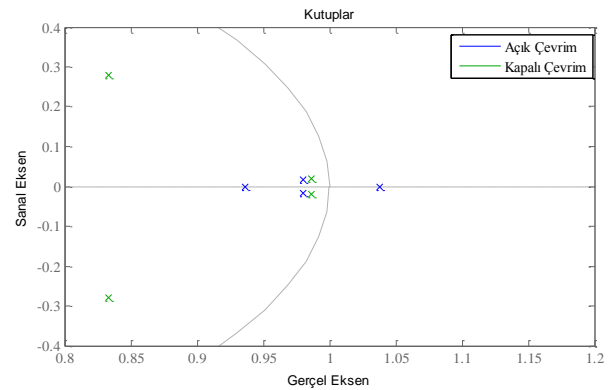
$$Q_{ii} = \frac{1}{(x_{i_{\max}})^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad R = \frac{1}{(u_{\max})^2} \rho \quad (20)$$

n durum değişkenli bir sistemde her bir durum değişkeninin ağırlık katsayısı (Q_{ii}) o değişkenin maksimum kabul edilebilir hata miktarına göre belirlenebilmektedir. R değerinin belirlenmesi ise kontrol sinyalinin maksimum değerine bağlıdır. Eğer Denklem (19) ile verilen $x(t)^T Q x(t)$ ve $u(t)^T R u(t)$ hesaplanırsa Denklem (21)'de verilen maliyet fonksiyonu elde edilir. Yani, toplam maliyet, her birinin izin verilebilir maksimum değeriyle normalize edilen, tek tek durumların karelerinin ve kontrol girişlerinin toplamıdır [11]. Bu yöntem uygun kontrolör seçimi için olası başlangıç noktasını verir. Sistem çıkışına göre istenen çıkışın elde edilebilmesi için de parametre ayarı yapılır.

$$J = \int_0^{\infty} \left[\frac{x_1(t)^2}{x_{1_{\max}}^2} + \dots + \frac{x_n(t)^2}{x_{n_{\max}}^2} + \frac{u_1(t)^2}{u_{1_{\max}}^2} + \dots + \frac{u_m(t)^2}{u_{m_{\max}}^2} \right] dt \quad (21)$$

Denge kolunun açısal konumu için kabul edilebilir maksimum hatanın $0,01^\circ$ olduğunu ve açısal değişim için $0,01^\circ/\text{sn}$ olduğunu varsayalım. Araba konumu için ise 1 cm ve hızı için 5 cm/sn olsun. Bu durumda Q matrisi aşağıdaki gibi elde edilir (Q matrisi radyan ve metre birimleri ile hesaplanmıştır). Ayrıca R = 1 olarak seçilirse bu ağırlık matrislerine göre kontrolör performansı incelenebilir.

$$Q = 10^3 \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 328 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 13 \end{bmatrix} \quad (22)$$



Şekil 3. z uzayı açık/kapalı çevrim sistem kutupları (Open-closed loop poles of the system in z domain)

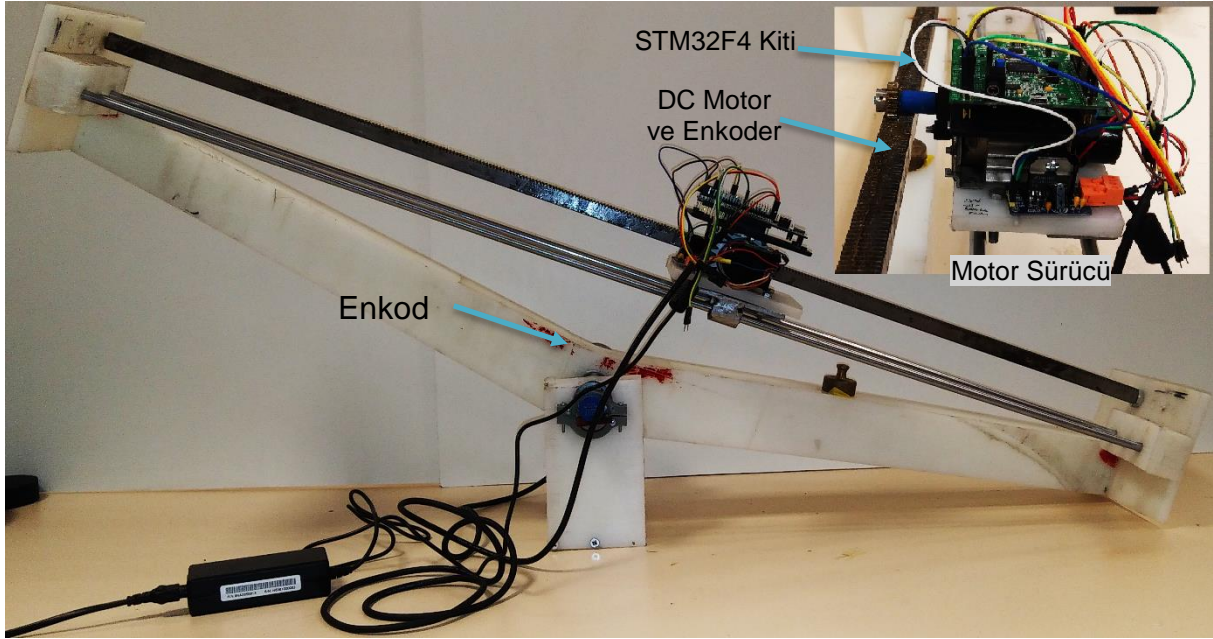
Belirlenen Q ve R parametrelerine göre ayrık zamanlı sistem modeli kullanılarak elde edilen kazanç matrisi [814.9 -1012.9 105.4 -0.284.2]'dir. Matematiksel model ile geliştirilen gerçek zamanlı denetim modeli arasında derece-radyan, mm-m ve volt-%doluluk oranı birim dönüşümleri yapılsa; kazanç matrisi [4.07 -88.42 0.52 -24.77] şeklinde elde edilir. Elde edilen kazanç matrisi ile kontrolcü sisteme uygulanır. Bu kontrolcünün sisteme uygulanması sonucunda sistemin kontrolçüye cevabı incelenir. Sistem cevabında arabanın ve denge kolunun davranış biçimine göre ağırlık katsayıları güncellenir. Bu değerlerden yola çıkarak elde edilen kazanç vektörü eşitlik (23)'te verilmiştir. Çizelge 1'de verilen sistem parametreleri ve aşağıda verilen kazanç

vektörü kullanılarak $T=0.01$ sn kontrol örnekleme periyodu için ayrıık zamanlı açık çevrim – kapalı çevrim sistem kutupları Şekil 3'te çizdirilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi sistemi kararsız kılan birim çemberin dışındaki kutup durum geri besleme yöntemi ile birim dairenin içine atanarak sistem kararlı kılınmıştır.

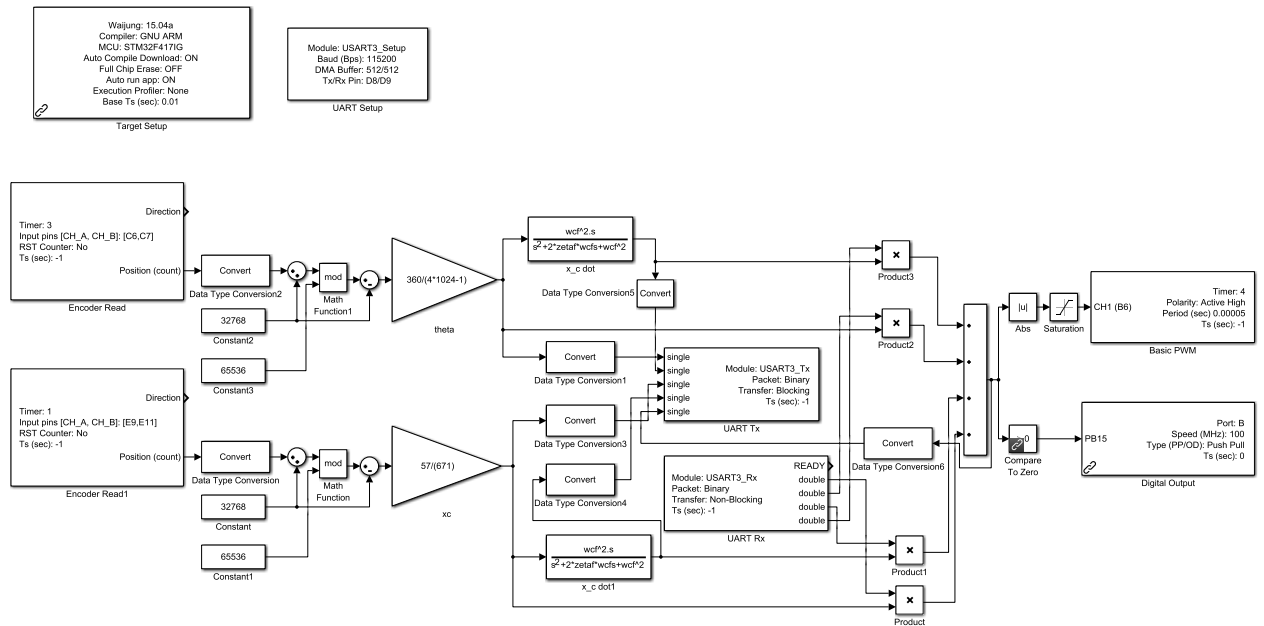
$$K = [5 \quad -88 \quad 0.3 \quad -15.1] \quad (23)$$

Geliştirilen dengeleme sistemi deney düzeneği Şekil 4'te görülmektedir. Sistemin taşıyıcı malzemesi polietilen levhadan imal edilmiştir. Sistem iki eşit uzunluktaki koldan meydana gelmekte ve orta noktadan serbestçe

dönebilecek şekilde sabitlenmiştir. Kolların açısı 1024 darbe/tur oranına sahip bir enkoderle (optik kodlayıcı) ölçülmektedir. İki kol arasında ise hareketli bir araba bulunmaktadır. Araba bir DC motor tarafından tahrik edilmekte ve dişli bir ray üzerinde hareket etmektedir. Arabanın konumunu ölçmek için motor üzerinde 672 darbe/tur oranına sahip bir enkoder bulunmaktadır. Motor LMD18200 sürücüsü ile kontrol edilmektedir. Denetim algoritması ise ARM tabanlı STM32F4 discovery kiti üzerinde koşturmaktadır.

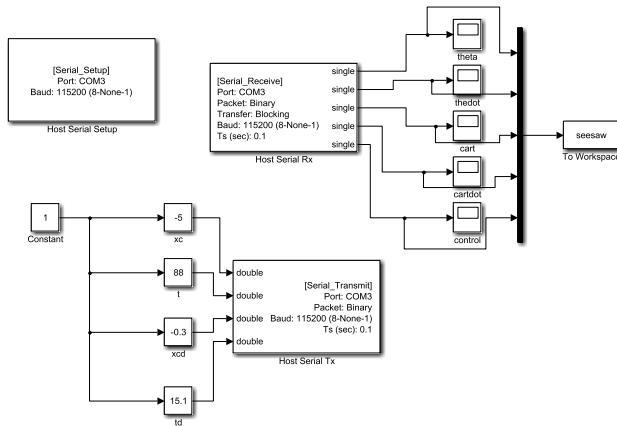


Şekil 4. Dengeleme sistemi deney düzeneği (Seesaw experimental setup)

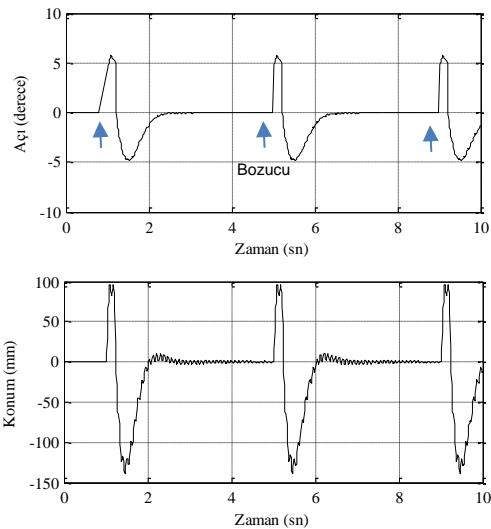


Şekil 5. STM32F4 üzerinde koşturulan kontrol algoritması (Control algorithm embedded on the STM32F4)

Gerçek zamanlı kontrol tasarımı ise hızlı kontrol prototiplenmesi tekniği ile Waijung [12], [13] blok seti kullanılarak geliştirilmiştir. Şekil 5'te STM32F4 kiti için tasarlanan denetim modeli görülmektedir. İki enkoder bloğu kullanılarak enkoderler okunmuş ve konum ve açı ölçümleri mm ve derece birimlerine dönüştürülmüştür. Açılal hız ve arabanın hızı için ikinci dereceden alçak geçiren türev filtresi kullanılmıştır. Elde edilen dört durum değişkeni ise 115200 bps hızında seri port üzerinden bilgisayardan alınan kontrol kazançları ile çarpılarak kontrol çıkışı hesaplanmaktadır. Hesaplanan kontrol sinyali ise DC motora uygulanan 20 KHz frekanslı bir PWM sinyalinin doluluk oranını ve motor dönme yönünü kontrol etmektedir. Uygulama için $T=0.01$ sn'lik kontrol örnekleme periyodu tercih edilmiştir. Şekil 6'da ise bilgisayarda koşan ve kitle iletişim yapabilen test, analiz, veri toplama, kazanç ayarlama amacıyla kullanılan model görülmektedir.



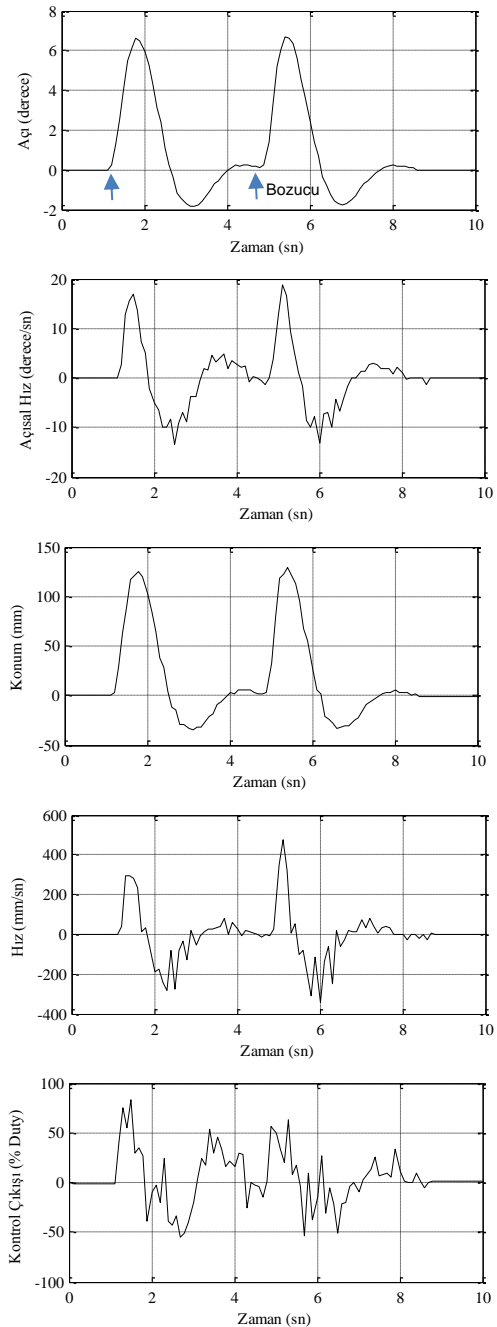
Şekil 6. Veri toplama, test ve kazanç ayarlama modeli (Hardware in the loop model)



Şekil 7. Sistem dengedeyken kuvvet uygulanarak dengenin bozulması - benzetim (External disturbances applied when system was stabilized - simulation)

4. BENZETİM ÇALIŞMALARI VE DENEYSEL SONUÇLAR (SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULTS)

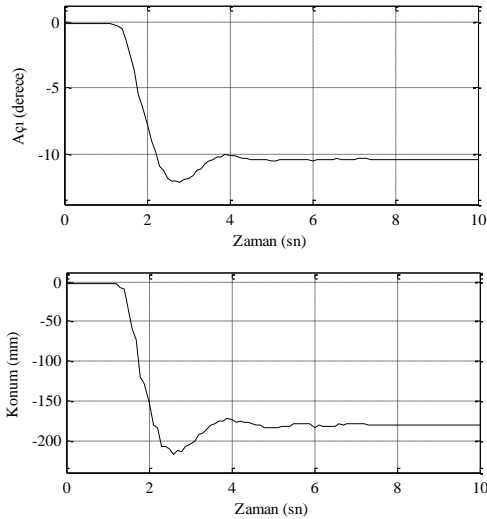
Öncelikle hesaplanan kazanç değerleri kullanılarak dış bozucu etki altında benzetim sonucu verilecektir. Şekil 7'de yapılan benzetime ait denge açısının ve araba konumunun değişimi görülmektedir. Benzetim sonuçları Şekil 8'de verilen gerçek sistem üzerinde gerçekleştirilen deney sonucu ile karşılaştırıldığında her iki durum için benzer yanıtın alındığı görülmektedir.



Şekil 8. Sistem dengedeyken kuvvet uygulanarak dengenin bozulması - deneysel (External disturbances applied when system was stabilized - experimental)

Deney düzeneğinde artımsal enkoder bulunduğu için enerji verildiğinde başlangıç konumları sıfır olarak alınır. Dolayısı ile araba orta konumunda ve sistem dengede iken sisteme enerji verilerek hazır hale getirilir. Bilgisayar uygulaması çalıştırılarak karşılıklı haberleşme sağlanır. Sistemden deneysel olarak birkaç veri toplanmıştır. Sistem dengede iken dengeyi bozacak dış bozucular, denge kolunun bir tarafının uç noktasına 100 gr'lık bir ağırlık koyulduğunda ve konulan ağırlığın alınması durumları için elde edilene yanıtlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

Şekil 8'de sistem dengede iken sistemin dengesini bozacak şekilde kuvvet uygulanmış daha sonra kuvvet kaldırılmıştır. Şekil üzerinde bozucu kuvvetin uygulandığı anlar gösterilmiştir. Denge açısı, açısal hızı, arabanın konumu, hızı ve uygulanan kontrol sinyali yanıtları şekilde verilmiştir. Her iki bozucu etki altında, uygulanan kuvvetle açının 7° civarına ulaştığı, kaldırılmasıyla ise dengenin başarıyla sağlandığı görülmektedir.

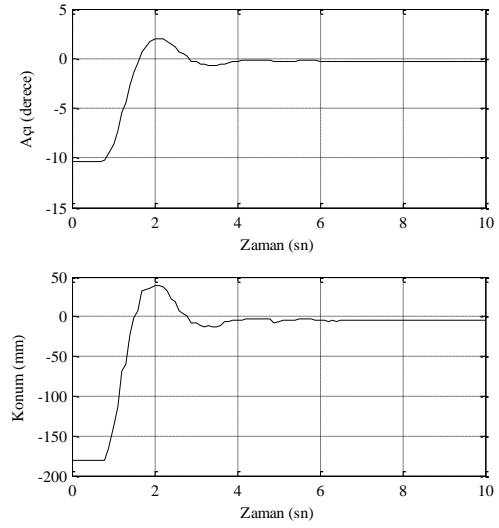


Şekil 9. Sistem dengede iken 100 gr'lık ağırlık eklenmesi (100 g weight added when system is in balance)

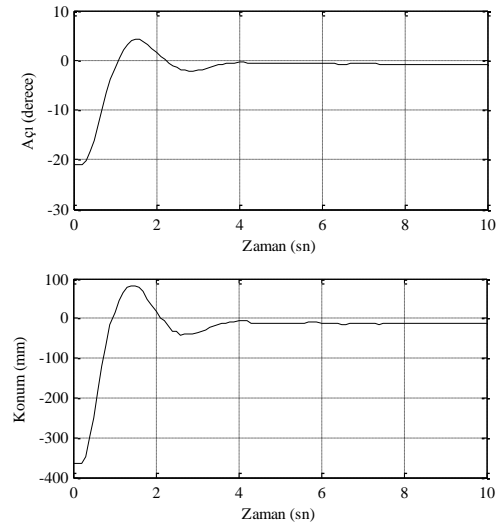
Şekil 9'da ise denge kolunun bir ucuna 100 gr ağırlıklı bir kütle bırakılmasıyla elde edilen denge açısı ve araba konumu görülmektedir. Denetleyicinin sistemi -11° civarında dengelediği görülmektedir. Şekil 10'da benzer şekilde kütle alınmasıyla elde edilen yanıt görülmektedir. Kütle alınmasıyla sistemin tekrar yatay düzlemde dengelendiği gözlemlenmiştir. Sistemin tek durum değişkeni açı değildir, açı, araba konumu, açısal değişim ve araba hızı ise diğer durum değişkenleridir. Tüm durumlar için referans sıfırdır. Dolayısı ile kontrolcü yalnızca açıyı kontrol etmemektedir. Seçilen Q ve R optimum parametreleriyle alınan sonuçlar sunulmuştur. Ayrıca sistemde integratör bulunmamaktadır. Koyulan ekstra ağırlıkla sistemin ağırlık merkezi değiştirilmiş dolayısı ile buna göre sistem dengelenmiştir.

Şekil 11'de ise denge koluna kuvvet uygulanarak sistemin alabileceği maksimum eğim verilmiştir.

Kuvvetin kaldırılmasıyla sistemin 3 sn içinde kalıcı durum rejim bölgesine girdiği ve denge açısı - araba konumu sistem durumlarının sıfır referansında başarılı şekilde kontrol edildiği görülmektedir.



Şekil 10. Ağırlığın alınması (Weight removing)



Şekil 11. Maksimum açısal konumdan sistemin serbest bırakılması (Release of the system from maximum angular position)

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada DKS sisteminin Lagrange tabanlı modellenmesi detaylarıyla verilmiş, tam durum geri besleme yöntemi, Bryson kuralı ve doğrusal karesel regülatör kullanılarak gerçek zamanlı denetim yapısı geliştirilmiş ve çeşitli bozucu etkiler altında elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlar sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde denge kontrolünün önerilen yöntemle başarılı şekilde sağlandığı görülmektedir. Aynı zamanda bu çalışmada önerilen sistem kontrol derslerinde, laboratuvarlarında kullanılabilir ve kullanılan hızlı kontrol prototiplenmesi yöntemi ile düşük maliyetli kontrol düzenekleri geliştirilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Lin, J., Lai, H.Y. & Chang, “Stabilization and Equilibrium Control for Electrically Cart–Seesaw Systems by Neuro-fuzzy Approach”, *J. J. Vib. Eng. Technol.* 6: 1, (2018).
- [2] <https://www.quanser.com/products/seesaw/>, “SeeSaw Laboratory guide”, (2019)
- [3] M. J. Mahmoodabadi, A. Bagheri, N. Nariman-zadeh, A. Jamali, and R. Abedzadeh Maafi, “Pareto Design of Decoupled Sliding-Mode Controllers for Nonlinear Systems Based on a Multiobjective Genetic Algorithm,” *Journal of Applied Mathematics*, (2012).
- [4] C. Wu, “Quasi time-optimal PID control of multivariable systems: A seesaw example,” *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 22(5): 617–625, (2011).
- [5] B.M. Chung, J.W. Lee, H.H. Joo, Y.K. Lim, “Hybrid Fuzzy Learning Controller for an Unstable Nonlinear System,” *International Journal of the KSPE*, 1(1): 79–83, (2000).
- [6] C.H. Tsai, H.Y. Chung, F.M. Yu, “Neuro-sliding mode control with its applications to seesaw systems,” *IEEE Transactions on Neural Networks*, 15(1): 124–134, (2004).
- [7] J. Lin, J. Zhan, J. Chang, “Stabilization and equilibrium control of a new pneumatic cart-seesaw system,” *Robotica*, 26(2): 219–227, (2008).
- [8] J. Lin, Y.S. Ding, J. Chang, “Balancing and swinging-up control for cart-pendulum-seesaw system by decomposed fuzzy coordination control,” *Journal of Vibration and Control*, 20(6): 925–942, (2012).
- [9] S. Kizir, Z. Bingül, C. Oysu, “Ters Sarkaç Probleminin PID ve Tam Durum Geri-Besleme Yöntemleri ile Kontrolü,” *TOK 2007 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, İstanbul, Türkiye, 49–54, (2007).
- [10] Li B., Rotational Double Inverted Pendulum, *Master Thesis*, University Of Dayton, Dayton, Unites States, (2013).
- [11] Bryson A. E., Ho Y.-C., “*Applied optimal control: optimization, estimation, and control*”, Taylor & Francis Group, (1975).
- [12] T. Yaren, V. Süel, Y. Yeniaydın, B. Sakacı, S. Kizir, “STM32F4 Kiti ile Simulink Tabanlı Kontrol Eğitimi Uygulamaları Geliştirme,” *TOK2014 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Kocaeli, Türkiye, 868–873, (2014).
- [13] S. Kizir, T. Yaren, E. Kelekçi, “*Gerçek Zamanlı Kontrol - Teori ve Mühendislik Uygulamaları*”, Seçkin Yayınevi, Ankara, 2019.



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Doluluk oranlarının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri

Effects of filling percentage on mechanical properties of PLA and PET materials

Yazar(lar) (Author(s)): Hatice EVLEN¹, Merve Ayfer ÖZDEMİR², Aydın ÇALIŞKAN³

ORCID¹: 0000-0002-8214-6286

ORCID²: 0000-0002-5406-6879

ORCID³: 0000-0002-5639-637X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Evlen H., Özdemir M. A. ve Çalışkan A., “Doluluk oranlarının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1031-1037, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.426413

Doluluk Oranlarının PLA ve PET Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri

Araştırma Makalesi / Research Article

Hatice EVLEN^{1*}, Merve Ayfer ÖZDEMİR², Aydın ÇALIŞKAN²

¹Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Müh. Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

²Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Tasarım Müh. Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.10.2016 ; Kabul/Accepted : 26.08.2017)

ÖZ

Gerçekleştirilen çalışmada, yığma teknolojisi ile üretim yapan bir yazıcı modellemek ve modellenen üç boyutlu yazıcıda doluluk oranının mekanik özellikler üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında kartezyen tipi açık kaynaklı bir üç boyutlu yazıcı modellenmiştir. Prototip imalatı yapılan üç boyutlu yazıcı kullanılarak PET ve PLA malzemelerin %10, 20, 30, 40 ve %50 doluluk oranlarında mekanik test numuneleri yazdırılmıştır. Elde edilen numuneler tek eksenli çekme testleri tabii tutulmuş, sertlik ve pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Yapılan ölçümler neticesinde PET ve PLA malzemelerde sertlik değerinin malzemenin doluluk oranı ile doğru orantılı olduğu, doluluk oranı arttıkça malzemelerin sertliklerinin de arttığı görülmüştür. PLA ve PET malzemelerden üretilen numunelerin pürüzlülük ve çekme değerlerinin birbiriyle ters orantılı olduğu, pürüzlülük ve çekme mukavemeti değerlerinin %30 doluluk oranından itibaren %10 ve %20 doluluk oranındaki aksine yönde seyrettiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Doluluk oranı, PET, PLA, pürüzlülük, sertlik.

Effects of Filling Percentage on Mechanical Properties of PLA and PET Materials

ABSTRACT

In this study, it is aimed to design a printer which has fused deposition technology and determine experimentally the effect of infill percentage on the mechanical properties with samples produced on the printer. A Cartesian type and open source three dimensional printer was modelled. Mechanical test samples were printed at 10, 20, 30, 40 and 50% infill percentage of PET and PLA materials using a three-dimensional printer manufactured as a prototype. Using the obtained samples, uniaxial tensile tests, hardness and surface roughness values were measured. As a result of the measurements, the hardness values of PET and PLA materials were directly related to the infill percentage of the material, and the hardness of the materials increased as the filling percentage increased. It was observed that roughness and tensile values of PLA and PET materials were inversely related to each other and roughness and tensile strength values were observed in the opposite direction from 30% infill percentage to 10% and 20% infill percentage.

Keywords: Infill percentage, PET, PLA, surface roughness, hardness.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Üç boyutlu yazıcılar, 3 boyutlu olarak çizilen geometriyi katı, elle tutulabilir gerçek objelere dönüştürebilen makinelerdir. Eklemeli imalat (additive manufacturing) olarak da bilinen bu teknolojinin en büyük avantajı geleneksel imalat yöntemleri ile üretilemeyen karmaşık yapıdaki geometrilerin kalıba ya da başka herhangi bir araca ihtiyaç duymadan üretilmesidir. Eklemeli imalat teknolojileri hammaddenin katman katman yığılması mantığına dayanmaktadır.

Üç boyutlu olarak herhangi bir CAD programında modellenen nesne “.STL (stereolithography)” formatında kaydedilir. Böylece model, parçayı bölüntüleme işlemini yapacak programa gönderilmeye hazır hale getirilmiş olur. Üç boyutlu model oluşturma aşamasından sonra modelin 3B’lu yazıcıya transferi için arayüz programına aktarılması gerekmektedir. Böylelikle 3B’lu nesnenin doluluk oranı, dolgu geometrisi, katman yüksekliği gibi

yazdırma parametreleri kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. Arayüz programında yazdırma parametreleri belirlenen model dilimleme işlemine tabii tutulur. Bunun neticesinde yazıcı uç yolları ve üretim kodları üretilmiş olur. Genellikle tescilli ve markalı 3B’lu yazıcılar kendileri için tasarlanmış arayüz programları ile satışa sunulmaktadırlar. Ancak açık kaynaklı yazıcılar için de ücretli ve ücretsiz birçok farklı arayüz programı mevcuttur. Skeinforge, RepRap Host, SuperSkein, Slicer, Cura, KiSSlicer, Repetier Host ücretsiz açık kaynaklı programlardır.

Günümüzde üç boyutlu yazıcı teknolojisi; tıbbi ekipman ve yapay organ üretiminde, endüstriyel ve mimari tasarımlarda, inşaat mühendisliğinde, yapı işlerinde, otomotiv sanayisinde, havacılık ve uzay endüstrisinde, dişçilikte, eğitimde, coğrafik topografya çalışmalarında ve daha birçok farklı alanda yapılan bilimsel çalışmalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Araştırmacılar eklemeli imalat teknolojisinin farklı tür ve yazdırma parametrelerini kıyaslayan birçok yaygın

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : hkgul@karabuk.edu.tr

yapmışlardır. Eklemeli imalat teknolojileriyle ilgili yapılan araştırmalarda kullanım kolaylığı, ulaşılabilirlik ve sarf malzeme maliyetinin düşük olması açısından özellikle Eriyik Yığıma Modelleme (Fused Deposition Modelling-FDM) teknolojisi tercih edilmiştir. Yapılan çalışmada genel olarak FDM teknolojisinin ürünün mekanik özellikleri [1-3], geometrik ve boyutsal hassasiyeti [4], yüzey pürüzlülüğü [5], üzerine etkileri incelenirken, FDM teknolojisinin genel özellikleri [6, 7], farklı modelleme metotlarıyla kıyaslanması [8] ve ürünün yazıcı tablasındaki konumlandırmasının mekanik özellikler üzerine etkileri [9] de incelenmiştir. Üç boyutlu yazıcılarla ilgili yapılan çalışmaların birçoğunun baskı kalitesini artırmak ve en iyi baskı parametrelerini tespit etmek üzere yapıldığı söylenebilmektedir. Araştırmacılar baskı teknolojisinin ve baskı parametrelerinin yanı sıra sarf malzeme üzerinde yapılan iyileştirme çalışmalarının da ürünün kalitesini artırdığını tespit etmişlerdir. Stephens ve arkadaşları [10] üç boyutlu yazıcı malzemelerinin tane boyutunu küçültmek daha iyi kalitede ürün elde etmeye yönelik çalışmalar yapmışlardır. Bunların yanında FDM teknolojisinde kullanılan biyo malzemeler, nano malzemeler ve polimer matrisli kompozitlerin hızlı prototiplenmesi üzerine de yoğunlaşmıştır.

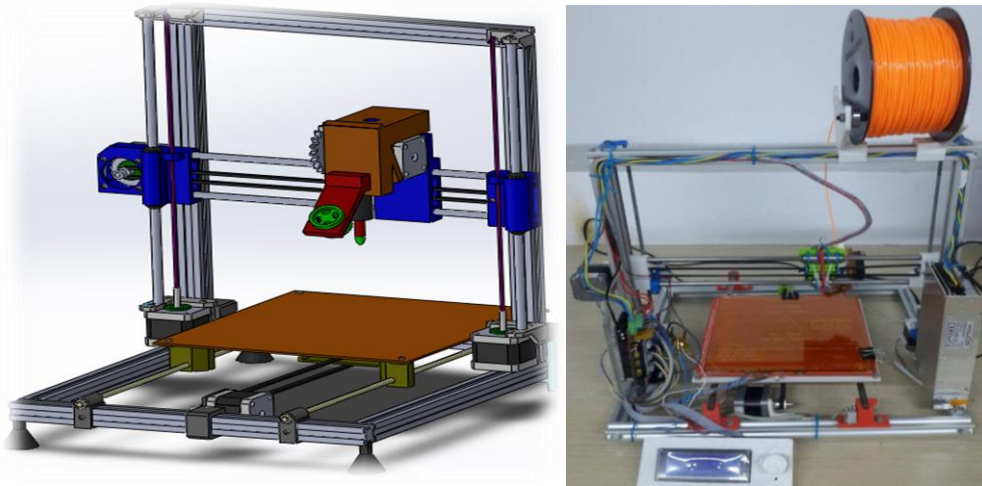
processing (DLP)) [25, 26], eriyik yığıma modelleme (Fused deposition modelling (FDM)) [27-31] gibi katman katman yazdırma mantığıyla çalışan 3 boyutlu yazıcılarda tercih edilen bazı biyo malzemelerdir.

Bunların dışında farklı takviye elemanı ve matris malzemeleriyle biyo ve nano kompozitler hazırlayıp, bunların üç boyutlu yazıcılardaki uygulamalarını araştıran çalışmalar da literatürde mevcuttur [32-35]. Böylelikle eklemeli imalat teknolojileri ile daha mukavemetli, insan sağlığına ve çevreye daha duyarlı malzemelerin daha az enerji, iş gücü ve maliyet ile son ürün kalitesinde üretilmesi amaçlanmaktadır.

Gerçekleştirilen çalışmada açık kaynaklı bir üç boyutlu yazıcı modellenmiş, konstrüksiyonu yapılmıştır. Tasarlanan açık kaynaklı yazıcıda cisimlerin dilimlenmesi ve yazdırma parametrelerinin belirlenmesi için Repetier Host [36] arayüz programından faydalanılmıştır. SolidWorks [37] programında üç boyutlu CAD modeli oluşturulan deney numuneleri “.STL” formatında kaydedilip dilimleyici arayüz programına aktarılmıştır. PLA ve PET malzemelerden Çizelge 1.’de verilen üretim parametrelerinde çekme ve sertlik numuneleri üç boyutlu olarak üretilmiştir. Numuneler belirtilen deneylere tabi tutularak elde edilen bulgular kıyaslanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Üç boyutlu yazıcı ana gövdesi sigma profiller ile yapılmıştır (Şekil 1). Toplam dört adet adım motoru ve eksen hareketleri için triger kayış-kasnak sistemi kullanılmıştır. Tabla ölçüleri 20x20 boyutundadır ve tabla hareket sistemi lineer rulmanlar ile yataklanmıştır.



Şekil 1. Modellenen (solda) ve konstrüksiyonu sağlanan (sağda) yazıcı (Modeled (left) and constructed (right) printer)

Polilaktik asit (PLA) [11, 12], polilaktik asit ko-glikolik asit (PLGA) [13-15], polietereeterketon (PEEK) [16], akrilonitril butadien stiren (ABS) [17], polikaprolakton (PCL) [18], kalsiyum [18], çitosan [19, 20] gibi birçok polimer seçici lazer sinterleme (selective laser sintering (SLS)) [16, 21, 22], stereolitografi (stereolithography (SLA)) [23, 24], dijital ışık işlemi (digital light

Deneysel numuneler PLA ve PET malzemelerden çizgi kafes dolgu örüntüsü ile üretilmiştir. Malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 1.’de, çizgi kafes dolgu örüntüsü ise Şekil 2’de gösterilmiştir.

Çizelge 1. PLA ve PET malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri [38] (Physical and mechanical properties of PLA and PET materials)

| | | PET | PLA |
|----------------------------|---------------------------------------|-------------------------|----------------------|
| Fiziksel Özellikler | Yoğunluk | 0.0700 - 1.45 g/cc | 1.24 g/cc |
| | Erime akış hızı | | 7.00 - 9.00 g/10 dk. |
| | Erime Sıcaklığı | 245 °C | 165-180 °C |
| Mekanik Özellikler | Çekme Dayanımı | 90 MPa | 43 MPa |
| | Darbe Dayanımı | 0.200 J/cm ² | 0.310 J/cm |
| Termal Özellikler | Erime Noktası | 245 °C | 165-180 °C |
| | Maksimum Servis Sıcaklığı, Havada | 100 °C | 70 °C |
| | Camsı Geçiş Sıcaklığı, T _g | 98.0 °C | 55-60 °C |
| | Nozul Erime Sıcaklığı | 230 °C | 220 °C |

**Şekil 2.** Çizgi kafes dolgu örüntüsü (Rectilinear infill pattern)

Son 20 yıl içerisinde uygulama alanı hızla gelişen PET (polietilen tereftalat), en önemli mühendislik polimerlerinin arasına girmiştir. Kimyasal maddelere karşı olan kararlılığı, işlenebilirliği, renklendirilebilirliği ve üstün termal özellikleri mühendislik uygulamalarında tercih sebebi olmuşlardır. PET, termoplastikler arasında zayıf asitlere, bazlara ve çoğu çözücülere karşı dayanımı olduğu kadar, sağlamlık, sertlik, parlaklık ve yüksek darbe dayanımı gibi özellikleriyle de üstündür. Ayrıca PET 'in gaz geçirgenliği diğer plastiklerin çoğundan daha düşüktür [32]. PLA gıda ve ambalaj sektöründe, doğal organik kimyasallardan üretildiği için tercih edilen bir termoplastik malzemedir. 3B'lu baskı sektöründe, düşük genleşme katsayısından dolayı gündeme gelmiştir. Isı tablası gerektirmemesi veya ısı tablasına çok az ihtiyaç duyması ve parça büyüklüğünü tolere edebilmesi birçok üreticinin doğrudan bu malzemeyi tercihine sebep olmuştur. Ayrıca PLA, petrol bazlı yakıtlardan değil mısır nişastasından elde edildiği için diğer plastiklere göre çevre dostu malzemeler arasındadır. Biyo bozunur ve saydam olması sağlık alanındaki uygulamalarda dikkat çekmesini sağlamıştır [39-42]. PLA' nın en büyük dezavantajı gerilme uzaması, darbe direnci ve ısı dayanımının düşük olmasıdır [43]. Gerekli esnetici katkıları ile tokluğu arttırılsa da ABS kadar dayanım gösterememektedir [44]. Bir zayıflığı da düşük sayılabilecek sıcaklık altında (50-60°C) mekanik olarak yumuşamaya başlaması ve 80-90°C civarlarında deforme olmasıdır. Gerçekleştirilen çalışmada deneysel numunelerin baskısında Slic3r [45] programından yararlanılmıştır. Test numunelerinin üretimi Çizelge 2' de verilen parametrelerle yapılmıştır.

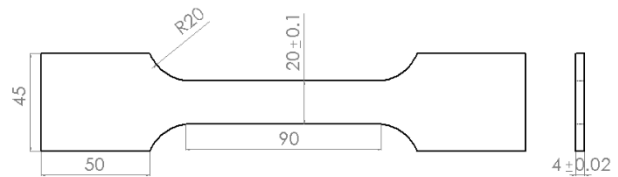
Çekme testi için beş farklı doluluk oranında her numuneden üçer adet olmak üzere toplam 15 adet çekme numunesi basılmıştır. Testler Karabük Üniversitesi

laboratuvarlarında bulunan SHIMADZU marka 50 kN kapasiteli çekme cihazında yapılmıştır. TS 138 A standardında üretilen çekme numunelerinin boyutları Şekil 3' de verilmiştir. Çekme testi için üretilen numuneler önce yüzey pürüzlülük testine tabi tutulmuştur. Çizgi kafes dolgu örüntüsü ile oluşturulmuş beş farklı doluluk oranına (%10-50) sahip numunelerin yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü için Mitutoyo marka cihazda yapılmıştır.

Çizelge 2. Deneysel numunelerin üretiminde kullanılan baskı parametreleri (Printing parameters used in the production of experimental samples)

| Yazıcı Malzemesi | PLA | PET |
|------------------------|--------------------|--------------------|
| Katman Yüksekliği (mm) | 0.4 | 0.4 |
| Doluluk Oranı (%) | 10, 20, 30, 40, 50 | 10, 20, 30, 40, 50 |
| Yazıcı Nozul sıcaklığı | 225°C | 220°C |
| Tabla Sıcaklığı | 25°C | 25°C |
| Kabuk sayısı | 2 | 2 |
| Filament Çapı (mm) | 1,75 | 1,75 |
| Dolgu Örüntüsü | Çizgi Kafes | Çizgi Kafes |

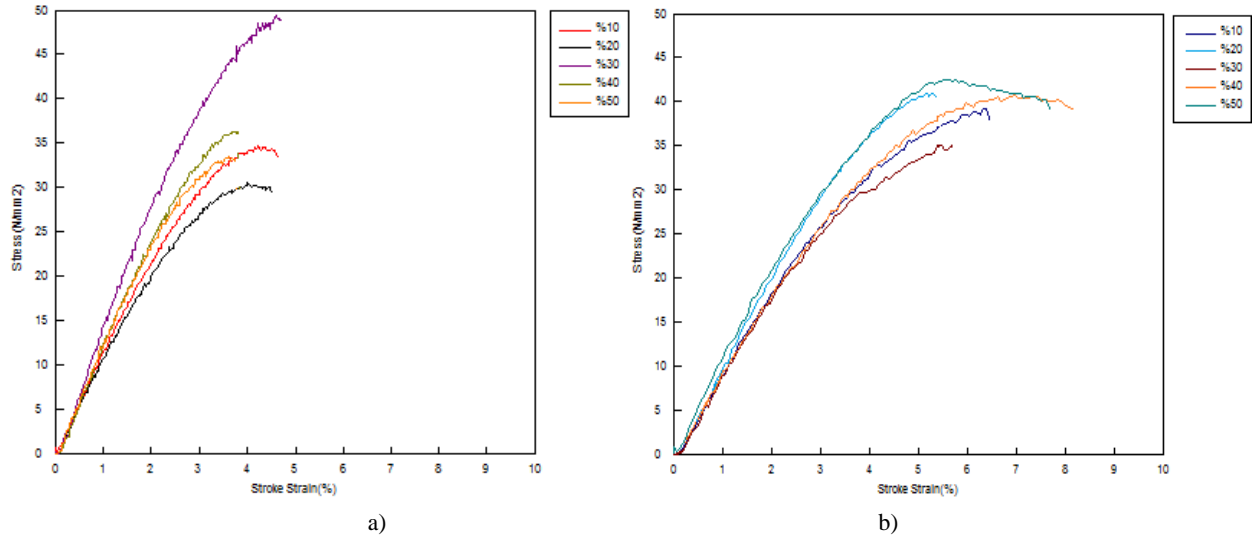
Shore D sertlik ölçümü yapmak üzere 10x10mm boyutlarında kübik sertlik ölçüm numuneleri de üretilmiştir. Her bir parametreden beşer ölçüm alınmış, bu ölçümlerin ortalaması hesaplanmış ve birbiriyle karşılaştırılmıştır. Sertlik ölçümleri PCE-DD D Dijital Shore D Durometre ile gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 3.** TS 138 A Standardına uygun çekme numunesi boyutları (Tensile specimen sizes according to TS 138 A Standard)

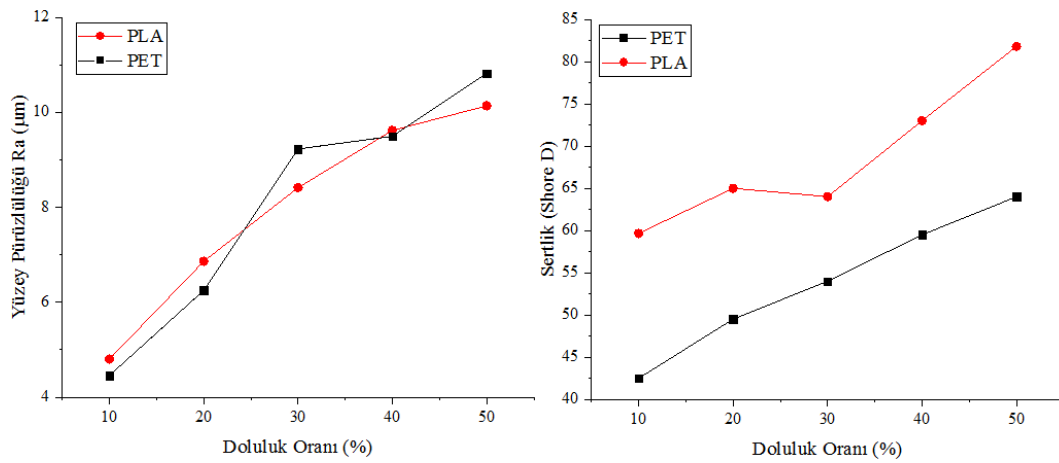
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Şekil 4a'da verilen çekme grafikleri değerlendirildiğinde; PLA malzemede %10 doluluk oranından %30 doluluk oranına doğru gittikçe artan bir çekme mukavemeti elde edildiği, ancak %40 ve %50 doluluk oranında çekme mukavemetinin azaldığı görülmektedir. Bu durumun mısır nişastası bazlı organik bir malzeme olan PLA' da katmanlar arasında olması beklenen adhezyonun yeterince gerçekleşmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Decuir ve arkadaşları farklı doluluk oranlarında ürettikleri PLA ve ABS numunelere çekme testine tabi tutmuşlardır [46]. Yaptıkları testlerde %20 ve %40 doluluk oranında PLA malzemenin çekme mukavemetinin arttığını fakat %60 doluluk oranında azaldığını vurgulamışlardır.

Ancak doluluk oranı %80 ve %100 olduğunda çekme mukavemetinin tekrar arttığını, çekme mukavemetindeki bu değişimin sebebinin kullanılan yazıcıdan, filamentten ve yazdırma işleminde tercih edilen dolgu örüntüsünden kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir [46]. En düşük doluluk oranı olan %10 doluluk oranına sahip çizgi kafes dolgu örüntülü numunelerde en küçük çekme mukavemeti değeri 31 N/mm² olarak elde edilirken, en yüksek çekme mukavemeti değeri ise %30 doluluk oranına sahip numunelerde 48 N/mm² olarak elde edilmiştir. Şekil 4b'de verilen PET malzemenin çekme eğrilerinde ise doluluk oranı %10'dan %50'ye doğru gittikçe doluluk oranına paralel olarak çekme mukavemetinin de arttığı görülmüştür. En düşük doluluk oranı olan %10 doluluk oranına sahip çizgi kafes dolgu örüntülü numunelerde en küçük çekme mukavemeti değeri 34 N/mm² olarak elde edilirken, en yüksek çekme mukavemeti değeri ise %50 doluluk oranına sahip numunelerde 42 N/mm² olarak elde edilmiştir.



Şekil 4. Çekme deneyi grafikleri, a) PLA malzemesi, b) PET malzemesi (Tensile test graphs, a) PLA material, b) PET material)



Şekil 5. PET ve PLA malzemeye ait a) Yüzey pürüzlülüğü, b) Sertlik grafikleri (PET and PLA material a) Surface roughness, b) Hardness graphs)

Şekil 5a'da yer alan yüzey pürüzlülük grafiğine bakıldığında; PLA malzemenin en büyük yüzey pürüzlülük değerinin $R_a=10,82\mu\text{m}$ ile %50 doluluk oranında, en küçük yüzey pürüzlülük değerinin $R_a=4,46\mu\text{m}$ değeri ile %10 doluluk oranında elde edildiği, PET malzemede ise en büyük yüzey pürüzlülük değerinin $R_a=4,80\mu\text{m}$ ile %50 doluluk oranında, en küçük yüzey pürüzlülük değerinin ise $R_a=10,14\mu\text{m}$ değeri ile %10 doluluk oranında elde edildiği görülmektedir. PET malzemenin üretilen numunelerde %30 doluluk oranında yüzey pürüzlülüğü hızlı bir artış göstermiştir. Bu da malzemenin %30 doluluk oranında çekme mukavemetinin düşmesine sebep olmuştur. Numune yüzeyinde oluşan pürüzlülüğün artış sebebinin ise yazdırma işlemi esnasında gerçekleşen yazıcı kaynaklı bir sorundan olduğu düşünülmektedir.

Sertlik ölçüm sonuçlarının yüzey pürüzlülüğü değerlerini destekler nitelikte olduğu Şekil 5'den görülmektedir. Ayrıca doluluk oranı arttıkça sertlik ve pürüzlülük değerleri de artmaktadır. Bu durum literatürde yapılan çalışmaları destekler niteliktedir [47]. PLA malzeme grubunda en büyük sertlik değeri 81,8 Shore ile %50 doluluk oranında, en küçük sertlik değerinin ise 59,66 Shore ile %10 doluluk oranında elde edildiği görülmektedir. PET malzeme grubunda da benzer bir davranış sergilenmiş ve en büyük sertlik değeri 64 Shore ile %50 doluluk oranında, en küçük sertlik değerinin ise 42,5 Shore ile %10 doluluk oranında elde edildiği görülmüştür.

Doluluk oranı, 3b yazıcılarda imalatı yapılacak parçanın içinin malzemeyle doldurulma miktarıdır. Dolayısıyla doluluk oranı arttıkça yazıcı ucunun izleyeceği yol sıklığı artmaktadır. Bu da katmanlar arasındaki adhezyonu güçlendirecek ve malzemenin mukavemet değerlerini olumlu etkileyecektir. Ancak izlenecek yol sıklığı dolayısıyla dolgu oranı arttıkça parçanın yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır (Şekil 5a) [48]. Yüzey pürüzlülüğünün artması PLA gibi nişasta kökenli bir polimerde çentik etkisi oluşturup malzemenin mukavemet değerlerini düşürmüştür. Ayrıca nişasta kökenli olan PLA malzeme ortam koşullarından etkilenmekte, oksijenle temas süresi arttıkça nem almakta ve dolayısıyla da mukavemet değerleri değişiklik gösterebilmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Gerçekleştirilen deneysel çalışmanın neticesinde PLA ve PET malzemenin çekme testi değerlerinde doluluk oranının artmasıyla çekme mukavemeti değerlerinde düzenli bir artış veya azalmanın olmadığı görülmüştür. PLA malzemede pürüzlülük değeri ile çekme mukavemeti ve çekme mukavemeti ile sertlik değerleri arasında ters bir orantı olduğu, pürüzlülük arttıkça çekme mukavemeti değerinin azaldığı; sertlik ve pürüzlülük değerlerinin birbirleriyle doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. PLA malzeme ekstrüzyon esnasında ya da yazıcıda kullanımı esnasında neme maruz kaldığında farklı tepkiler verebilmektedir. PLA malzemenin

ekstrüzyonundan önce malzemenin kurutma fırınında kurutulması ve ekstrüzyon esnasında da vakumlama ya da gaz ortamında oksijen giderme işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Filament üretildikten sonra ise kullanımında filament malzemenin oksijenle uzun süreli teması engellenmeli, mümkünse kapalı kapta muhafaza edilmelidir. Aksi halde filament gevrekleşmekte, esnekliğini ve mukavemetini kaybetmekte, nozul ucunda baloncuklanma, hava boşluklarının oluşması, nozuldan fişirme ve renk değişikliği meydana gelmektedir.

Deneysel çalışmalarda numune üretimi gerçekleştirilen PLA malzeme Karabük Üniversitesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği laboratuvarlarında mevcut olan filament makarasından üretilmiştir. Dolayısıyla yukarıda sıralanan olumsuzluklar da göz önüne alındığında PLA malzemenin oksijenden ve nemden etkilenmiş olabileceği, bundan dolayı mukavemet değerlerinde bir belirsizlik olduğu söylenebilir. Dolayısıyla, daha sonraki yapılacak çalışmalarda kullanılacak PLA malzemenin oksijen ve nem ortamından uzaklaştırılarak muhafaza edilmesi gerektiği sonucuna ulaştırılmıştır.

PET malzeme grubunda ise sertlik çekme ve pürüzlülük değerlerinin doğru orantılı olduğu, sertlik arttıkça, çekme mukavemetinin de arttığı görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Szykiedansa K. and Credo W., "Mechanical properties of FDM and SLA low-cost 3-D prints", *Procedia. Eng.*, 136: 257 – 262, (2016).
- [2] Dawoud M., Taha I. and Ebeid S.J., "Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques", *J. of Manuf. Proces.*, 21: 39–45, (2016).
- [3] Sood A.K., Ohdar R.K. and Mahapatra S.S., "Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement", *J. of Adv. Resea.*, 3: 81–90, (2012).
- [4] Gurralla P.K. and Regalla S.P., "DOE Based Parametric Study of Volumetric Change of FDM Parts", *Proc. Mater. Sci.*, 6: 354 – 360, (2014).
- [5] Nuñeza P.J., Rivasa A., García-Plaza E., Beaudub E. and Sanz-Loberac A., "Dimensional and surface texture characterization in Fused Deposition Modelling (FDM) with ABS plus", *Procedia Eng.*, 32: 856 – 863, (2015).
- [6] Jaina P. and Kutheb A.M., "Feasibility Study of manufacturing using rapid prototyping: FDM Approach", *Procedia Eng.*, 63: 4 – 11, (2013).
- [7] Leary M., Kron T., Keller C., Franich R., Lonski P., Subic A. and Brandt M., "Additive manufacture of custom radiation dosimetry phantoms: An automated method compatible with commercial polymer 3D printers", *Mater. and Design*, 86: 487–499, (2015).
- [8] Cubric D., Lencova B., Read F.H. and Zlamal J., "Comparison of FDM, FEM and BEM for electrostatic charged particle optics", *Nuclear Instr. and Methods in Phys. Resea. A*, 427: 357-362, (1996).
- [9] Rauta S., Jattib V.K.S., Nitin K., Khedkar K. and Singh T.P., "Investigation of the effect of built orientation on

- mechanical properties and total cost of FDM parts”, *Procedia Mater. Sci.*, 6:1625–1630, (2014).
- [10] Stephens B., Azimi P., Orch Z.E. and Ramos T., “Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers”, *Atmospheric Env.*, 79: 334-339, (2013).
- [11] Santoro M., Shah S.R., Walker J.L. and Mikos A.G., “Poly (lactic acid) nano fibrous scaffolds for tissue engineering”, *Adv. Drug Delivery Revie.* 107: 206-212, (2016).
- [12] Haddad T., Noel S. and De Crescenzo G., “Fabrication and surface modification of poly lactic acid (PLA) scaffolds with epidermal growth factor for neural tissue engineering”, *Biomatter.* 6(1):1–12, (2016).
- [13] Karp J.M., Shoichet M.S. and Davies J.E., “Bone formation on two-dimensional poly (DL-lactide- coglycolide) (PLGA) films and three-dimensional PLGA tissue engineering scaffolds in vitro”, *J. of Biomed. Mater. Resea. Part A.* 64A(2): 388-396, (2002).
- [14] Holy C.E., Cheng C., Davies J.E. and Shoichet M.S., “Optimizing the sterilization of PLGA scaffolds for use in tissue engineering”, *Biomaterials.* 22:25–31, (2000).
- [15] Sahoo S., Toh S.L. and Goh J.C.H., “A bFGF-releasing Silk/PLGA-based biohybrid scaffold for ligament/tendon tissue engineering using mesenchymal progenitor cells”, *Biomaterials.* 31(11):2990–2998, (2017).
- [16] Tan K.H., Chua C.K., Leong K.F., Cheah C.M., Cheang P., Abu Bakar M.S. and Cha S.W., “Scaffold development using selective laser sintering of polyetheretherketone–hydroxyapatite biocomposite blends”, *Biomaterials.* 24(18): 3115-3123, (2003).
- [17] Rosenzweig D., Carelli E., Steffen T., Jarzem P. and Haglund L., “3D-printed ABS and PLA scaffolds for cartilage and nucleus pulposus tissue regeneration”, *I. J. of Molec. Sci.* 16(7): 15118–15135, (2015).
- [18] Rau J.V., Antoniac I., Cama G., Komlev V.S. and Ravaglioli A., “Bioactive materials for bone tissue engineering”, *BioMed Resea. Int.* 2016:1-3, (2016).
- [19] Di A., Sittinger M. and Risbud M.V., “Chitosan: a versatile biopolymer for orthopaedic tissue-engineering”, *Biomaterials.* 26: 5983–5990, (2005).
- [20] Tan W., Krishnaraj R., Desai T.A., “Evaluation of Nanostructured Composite Collagen–Chitosan Matrices for Tissue Engineering”, *Tissue Eng.* 7(2): 203-210, (2001).
- [21] Williams J.M., Adewunmi A, Schek R.M., Flanagan C.L., Krebsbach P.H., Feinberg S.E., Hollister S.J. and Das S., “Bone tissue engineering using polycaprolactone scaffolds fabricated via selective laser sintering”, *Biomaterials.* 26: 4817–4827, (2005).
- [22] Zhou W.Y., Lee S.H., Wang M., Cheung W.L. and Ip W.Y., “Selective laser sintering of porous tissue engineering scaffolds from poly (L-lactide)/carbonated hydroxyapatite nanocomposite microspheres”, *J. of Mater. Sci. Mater. in Medicine.* 19(7): 2535–2540, (2008).
- [23] Cooke M.N., Fisher J.P., Dean D., Rimnac C. and Mikos A.G., “Use of stereolithography to manufacture critical-sized 3D biodegradable scaffolds for bone ingrowth”, *J. of Biomedical Mater. Resea. Part B Applied Biomat.* 64B(2): 65-69, (2015).
- [24] Seck T.M., Melchels F.P.W., Feijen J. And Grijpma D.W., “Designed poly (ethylene glycol)/poly(D,L-lactide)-based hydrogel structures prepared by stereolithography”, *11th European Symposium on Controlled Drug Delivery*, Netherlands, (2010).
- [25] Tesavibul P., Felzmann R., Gruber S., Liska R., Thompson I., Boccaccini A.R. and Stampfl J., “Processing of 45S5 Bioglass by lithography-based additive manufacturing”, *Mater. Lett.* 74: 81-84, (2012).
- [26] Zhu W., Ma X., Gou M., Mei D., Zhang K. and Chen S., “3D printing of functional biomaterials for tissue engineering”, *Current Opinion in Biotech.* 40: 103–112, (2016).
- [27] Hutmacher D.W., “Scaffolds in tissue engineering bone and cartilage”, *The Biomat.: Silver Jubilee Compendium.* 21: 2529–2543, (2006).
- [28] Sittinger M., Hutmacher D.W., Sittinger M. and Risbud M.V., “Scaffold-based tissue engineering: rationale for computer-aided design and solid free-form fabrication systems”, *Trends in Biotech.* 22(7): 354-362, (2004).
- [29] Yeong W., Chua C., Leong K. and Chandrasekaran M., “Rapid prototyping in tissue engineering: challenges and potential”, *Trends in Biotech.* 22: 643–652, (2005).
- [30] Zein I., Dietmar W.H., Kim C.T., Swee H.T., “Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications”, *Biomaterials.* 23(4): 1169-1185, (2002).
- [31] Gupta S., Bissoyi A., Bit A., “A Review on 3D Printable Techniques for Tissue Engineering”, *BioNanoScience.* 8(3): 868–883, (2018).
- [32] Ahrabi A.Z., Bilici İ., Bilgesu A.Y., “Pet Atıkları Kullanılarak Kompozit Malzeme Üretiminin Araştırılması”, *Gazi Üniv. Müh. Mimarlık Fak. Derg.*, 27:467-471, (2012).
- [33] Reddy M.M., Vivekanandhan S., Misraa M., Bhatia S.K. and Mohantya A.K., “Biobased plastics and bionanocomposites: Current status and future opportunities”, *Progress in Polym. Sci.*, 38:1653–1689, (2013).
- [34] Armentano I., Bitinis N., Fortunati E., Mattioli S., Rescignano N., Verdejo R., Machado M.A.L. and Kenny J.M., “Multifunctional nanostructured PLA materials for packaging and tissue engineering”, *Progr. in Polymer Sci.*, 38:1720–1747, (2013).
- [35] Raquez J.M., Habibi Y., Murariu M. and Dubois P., “Polylactide (PLA)-based nanocomposites”, *Progr. in Polymer Sci.*, 38:1504–1542, (2013).
- [36] www.repetier.com
- [37] www.solidworks.com
- [38] www.matweb.com
- [39] Koenig M.F. and Huang S.J., “Biodegradable blends and composites of polycaprolactone and starch derivatives”, *Polymer*, 36(9):1877-1882, (1995).
- [40] Park E.S., Kim M.N. and Yoon J.S.J., “Grafting of polycaprolactone onto poly(ethylene-co-vinyl alcohol) and application to polyethylene-based bioerodable blends”, *Polymer Sci. Part B Polymer Phys.*, 40:2561-2569, (2002).
- [41] Tsuji H. and Yamada T.J., “Blends of aliphatic polyesters. VIII. Effects of poly(L-lactide-co-ε-caprolactone) on enzymatic hydrolysis of poly(L-lactide), poly(ε-caprolactone), and their blend films”, *Applied Polymer Sci.*, 87: 412-419, (2003).

- [42] Maria D., Sanchez-Garcia and Jose M. L., “On the use of plant cellulose nanowhiskers to enhance the barrier properties of polylactic acid”, *Cellulose*, 17(5): 987–1004, (2010).
- [43] www.artiboyut.com/index.php/tr/bilgi-bankasi/67-filamentlerin-detayli-karsilastirilmesi
- [44] <http://priyoid.com/3d-yazici-hammaddeleri/yerli-filament-ureticisi-oo-kuma-ile-merak-edilen-sorulari-yanitladik/>
- [45] www.slicer.org
- [46] Decuir F., Phelan K. and Hollins B., “Mechanical Strength of 3-D Printed Filaments”, *32nd Southern Biomedical Engineering Conference*, Louisiana Tech. University, Ruston, LA United States, 47-48, (2016).
- [47] Göztaş Z., Tosun G., Yıldız E. and Kahraman K., “Nano doldurucu içeren beş farklı kompozitin yüzey sertliği ve pürüzlülüğü açısından değerlendirilmesi”, *Selcuk Dental J.*, 2: 43-48, (2014).
- [48] Özel C. and Baydar U., “Onarım Ve Güçlendirmede Kullanılan Polimer Betonların Aderans Özelliklerinin Beton Yüzey Karakteristikleri İle İlişkileri”, *SDU Int. J. of Tech. Sci.*, 8(3): 46-61, (2016).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Sivas ili şartlarında yatay toprak kaynaklı ısı pompasının ısıtma ve soğutma için performans analizi

Heating and cooling performance analysis of the horizontal ground source heat pump for Sivas conditions

Yazar(lar) (Author(s)): Ferhat KILINÇ¹, Ertan BUYRUK², Mustafa CANER³

ORCID¹: 0000-0003-2707-6438

ORCID²: 0000-0002-6539-7614

ORCID³: 0000-0002-3674-7881

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kılınç F., Buyruk E. ve Caner M., “Sivas ili şartlarında yatay toprak kaynaklı ısı pompasının ısıtma ve soğutma için performans analizi”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1039-1044, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.474467

Sivas İli Şartlarında Yatay Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Isıtma ve Soğutma İçin Performans Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Ferhat KILINÇ*, Ertan BUYRUK, Mustafa CANER

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, 58140, Türkiye

(Geliş/Received : 24.10.2018 ; Kabul/Accepted : 06.02.2019)

ÖZ

Bu deneysel çalışmada yatay toprak kaynaklı ısı pompası iki odadan oluşan toplam 51.3 m³ hacme uygulanarak, Sivas ili şartlarında ısıtma ve soğutma için performans analizi araştırılmıştır. Kış ve yaz aylarında gerçekleştirilen ölçümlerde; ısıtma ve soğutma için sırasıyla tipik bir kış/yaz günü olan 16 Aralık ve 29 Haziran tarihlerinde elde edilen değerler kullanılmıştır. Bu şekilde toprak kaynaklı ısı pompası uygulamasının Sivas iline ait davranış özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İç ve dış ortam sıcaklıkları, 4 farklı derinlikte ölçülmüş toprak sıcaklıkları ve ısı pompası elemanlarının giriş çıkış sıcaklıkları kayıt altına alınmıştır. Ölçülen veriler sistem ve ısı pompasına ait performans katsayısı değerlerini hesaplamada kullanılmıştır. Deneysel veriler kullanılarak ısıtma modunda ortalama performans katsayısı değerleri ısı pompası ve sistem için sırasıyla 2.10 ve 1.83, soğutma modunda ise ısı pompası için ortalama 4.79 ve sistem için ortalama 3.86 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca ısı pompası için ısıtma güç tüketimi ortalama değeri 2.83 kW, soğutma güç tüketimi ortalama değeri 1.69 kW olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Toprak kaynaklı ısı pompası, performans analizi, ısıtma, soğutma.

Heating and Cooling Performance Analysis of the Horizontal Ground Source Heat Pump for Sivas Conditions

ABSTRACT

In this experimental study, a horizontal ground source heat pump was applied to a total of 51.3 m³ volume consisting of two rooms and the performance analysis for heating and cooling in Sivas province were investigated. The values obtained on 16 December and 29 June which were typical winter/summer days were used for heating and cooling in winter and summer data measurements. In this way, it is aimed to determine the behavioral characteristics of the ground source heat pump application in Sivas province. The indoor and outdoor temperatures, ground temperatures measured at 4 different depths and the inlet and outlet temperatures of the heat pump elements were recorded. The measured datas were used to calculate the coefficient of performance values of the system and heat pump. By using the experimental datas, the average coefficient of performance values in heating mode were calculated as 2.10 and 1.83 for the heat pump and the system respectively, and also in cooling mode 4.79 for the heat pump and 3.86 for the system respectively. In addition, the average value of the heating power consumption for the heat pump was 2.83 kW and the average value of the cooling power consumption was 1.69 kW.

Keywords: Ground source heat pump, performance analysis, heating, cooling.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsanlığın varoluşuyla birlikte barınma ihtiyacı ve beraberinde ısıtma-soğutma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Isı pompaları, ülkemizde son zamanlarda kullanımı yaygınlaşmaya başlamış yenilenebilir enerji kaynağı sınıfında kabul edilen sistemlerdir. Ülkemizde performans katsayılarının tatmin edici olduğu ılıman iklim bölgelerinde tercih edilmektedir. Ancak son dönemde birçok farklı iklim bölgesine ait ısıtma-soğutma amaçlı ısı pompası uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ve sıcaklık değerlerinin kararlı olduğu toprak kaynaklı ısı pompaları (TKIP) bu uygulamaların başında yer

almaktadır. Ülkemizde ve dünyada ısı pompası uygulamalarıyla ilgili son yıllarda yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. İliman iklimde sahip Elazığ ilinde sera ısıtması için yatay (2m derinlikte) ve düşey (60m derinlikte) ısı pompası sistemlerinin performans karşılaştırmasının yapıldığı çalışmada; 2007-2008 yılı Kasım-Nisan aralığında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarda en soğuk aylarda ortalama performans katsayısı değerlerinin ısı pompası için 3.3-3.5 ve sistem için 3.0-3.2 olduğu elde edilmiştir. Isı pompalarının ısıtma ve soğutma için yüksek enerji verimliliği sunduğu, o çevrelerde yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi ve çevre dostu sistemler olduğu çalışmanın sonuç kısmında belirtilmiştir [1]. Naili vd. [2], çalışmalarında Tunus'un kuzeyinde sıcak iklim

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : fkilinc@cumhuriyet.edu.tr

bölgeleri için yatay toprak ısı eşanjörünün (YTIE) enerji ve ekserji analizini araştırmışlardır. Uzunluğu 50 m olan ve 1 m derinliğinde bulunan YTIE için farklı derinliklerde sıcaklık ölçümleri yapılarak toplam ısı transfer katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlarda enerji ve ekserji verimliliklerinin sırasıyla %18-52 ve %12-36 arasında değiştiği görülmüştür. Özdemir ve Özkaya [3], dikey tip toprak kaynaklı ısı pompası sistemi ile yaklaşık 21m³ hacme sahip bir odanın ısıtma ve soğutma işlemine ait enerji ve ekserji analizi yapmışlardır. Isıtma sezonunda ısı pompasının ve sistemin performans katsayısı değerleri sırasıyla 3.85 ve 3.45 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca ısı pompası için %77 ve sistem için %71 ekserji verimi elde etmişlerdir. Benzer şekilde soğutma sezonu için ısı pompasına ait performans katsayısı ve ekserji verimi değerleri 3.12 ve %78.6 olurken, sisteme ait değerler 2.81 ve %70.8 elde edilmiştir. Luo vd. [4], Almanya’da bir ofis binası için toprak kaynaklı ısı pompasının ısıl performansını incelemişlerdir. Isıtma ve soğutma analizi yapılan çalışmada binanın ısıtma yükünün soğutma yükünden iki kat fazla olduğu belirlenmiştir. Sıradan bir kış gününde COP değeri 3.9 iken, sıradan bir yaz günü için enerji verimlilik oranı (EER) 8.0 olarak bulunmuştur. Sezonluk EER değeri 6.1 ‘den 8.2 ‘ye çıkarken, sezonluk COP değerinin 4.1 ‘den 3.4 ‘e düştüğü sonucunu elde etmişlerdir. Şangay Jiao Tong Üniversitesi ‘nde 180 m² alana sahip bir toplantı odası için mini bir toprak kaynaklı ısı pompası tasarlanıp kurulumu yapılmıştır. Deneysel araştırmalar sonucunda mini ısı pompasının ortalama soğutma kapasitesi 17 kW ve COP değeri 3.2 elde edilmiştir [5]. Mao ve Chen [6], Çin’in Wuhan şehrinde bulunan 16.6 kW gücündeki TKIP sistemini test etmişlerdir. 6 gün boyunca ve 4 farklı derinliğe gömülmüş (10, 20, 40, 100 m) borulardan veriler alarak, performans katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak sisteme ait COP değerleri 1.56 ile 2.01 aralığında hesaplanmıştır. Avusturalya Melbourne’de dikey tip TKIP sistemlerinin konutlarda ekonomik analizinin yapıldığı çalışmada, 20 tane TKIP sisteminden elde edilen veriler kullanılmıştır. Tüketim maliyetlerinin toplandığı sistemlerin performans katsayısına ait ortalama değerler ısıtma ve soğutma için sırasıyla 3.8 ve 3.6 olarak hesaplanmıştır. 20 yıl ömür maliyeti olan sistemlerin 40 yıla çıkarılması durumunda yıllık 592\$ tasarruf sağlayacağı sonucu elde edilmiştir [7]. Caner [8], tez çalışmasında yatay tip toprak kaynaklı ısı pompasının ısıtma performansını incelemiştir. Sivas ilinde kış sezonunda yapılan ölçümler neticesinde ısı pompası için 1.96-2.30 ve sistem için 1.70-1.99 aralığında performans katsayısı değerleri elde edilmiştir. Yine benzer bir çalışmada yatay tip toprak kaynaklı ısı pompası kullanılarak sistemin performans katsayısı değerleri belirlenmiştir. Sonuç olarak performans katsayısı değerlerinin ısı pompası ve sistem için sırasıyla 2.05-2.18 ve 1.76-1.90 aralıklarında değiştiği elde edilmiştir [9]. Esen [10], sondaj derinliğinin ısıl sistem performansı üzerindeki etkisini ısıtma ve soğutma sezonu için Elazığ’da 30, 60 ve 90 m derinliğinde kuyular açarak

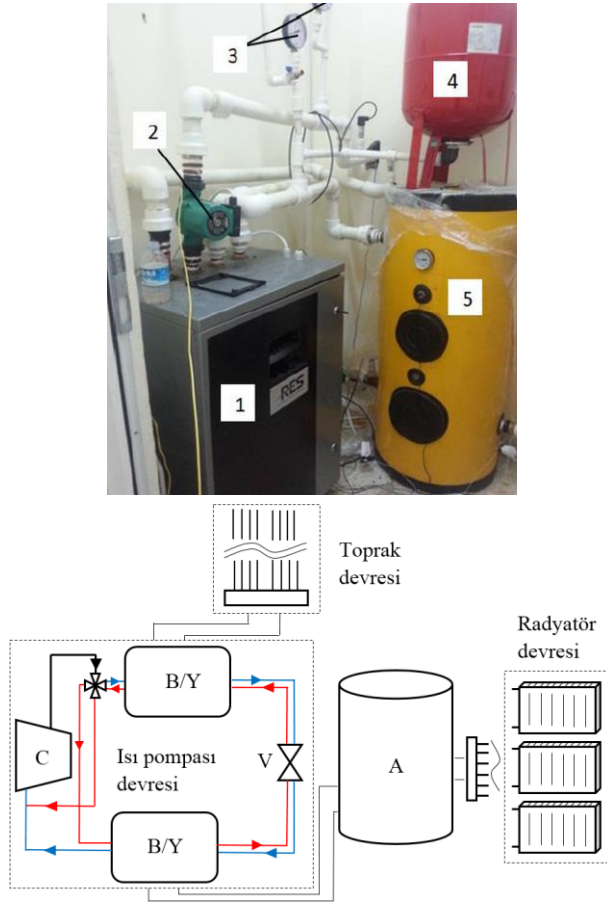
deneysel olarak araştırmıştır. Soğutma sezonunda ortalama toprak sıcaklıkları 30, 60 ve 60 m derinlikleri için sırasıyla 13.37, 16.23 ve 19.97 °C ve ısıtma sezonunda ise aynı derinlikler için sırasıyla 13.35, 17.07 ve 21.02 °C olarak ölçülmüştür. Isıtma sezonu için verilen derinliklerde hesaplanan COP değerleri sırasıyla 1.93, 2.37 ve 3.03 iken soğutma için 3.37, 3.85, 4.33 olmuştur. 90 m derinlikteki ısı pompası sisteminin en yüksek performansa sahip olduğu sonucu elde edilmiştir. Isı pompalarının konut ısıtması için kullanımının incelendiği çalışmada Erzurum ilinde 53 m derinliğinde dikey tip ısı pompası sistemi kurulmuştur. 2007 Ocak ve Mayıs aralığında yapılan deneyler neticesinde ısıtma sezonu için sistemin performans katsayısı 2.3 olarak hesaplanmıştır [11]. Atatürk Üniversitesi kampüsünde bulunan enerji laboratuvarında güneş enerjisi kaynaklı ısı pompası sistemi kurulmuştur. Deney sistemi güneş kolektörleri, sudan suya ısı pompası ve ısıtma ünitesi kısımlarından oluşmaktadır. Ölçüm sezonunun en soğuk günlerinden biri olan 14 Ocak tarihinde ısı pompası ve sisteme ait performans katsayısı değerleri sırasıyla 4.2 ve 3.6 olarak hesaplanmıştır [12]. Bursa ile için kış mevsimi koşulları dikkate alınarak yatay toprak kaynaklı ısı pompası sistemine ait performans değerlendirmesinin yapıldığı çalışmada; dış ortam sıcaklığı ve ortalama toprak sıcaklığının, sistem kapasitesi ve performans katsayısı üzerine etkisi incelenmiştir. Isı pompası ve sisteme ait performans katsayısı değerleri sırasıyla 2.46 – 2.58 ve 4.03 – 4.18 aralığında hesaplanmıştır [13]. Öztürk [14] Karabük Üniversitesinde bulunan laboratuvarında toprak kaynaklı ısı pompasıyla yaptığı yüksek lisans çalışmasında; boyutları 0.4x0.5x0.4 m olan ve yaklaşık 100 kg toprak kapasitesine sahip toprak haznesi kullanmıştır. Toprak neminin enerji tüketimine etkisini incelemek için %0 ile %40 aralığında değişen farklı nem oranlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Toprağın nem oranının artmasıyla, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı kapasitesinin sırasıyla %39 ve %32 oranında, sistem performansının ise %7 oranında arttığı belirlenmiştir.

TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardına göre Sivas ili 4. Bölgede olup kış için ortalama sıcaklık değeri -18 oC ‘dir. Ancak son yıllarda gerek dünya gerekse ülkemizdeki sıcaklık değişimlerinden Sivas ili de etkilenmiş ve sıcaklık ortalamaları kış ve yaz sezonunda artış göstermiştir. Son on yılda Ocak/Şubat aylarında 15.0 – 18.1 oC ve Temmuz/Ağustos aylarında 40.0 – 39.4 oC sıcaklık değerleri ölçülmüştür [15]. Bu durum karasal iklim etkisinin yoğun hissedildiği iç Anadolu bölgesi için ısı pompası uygulamasının kullanılabilirliğinin araştırılmasını akıllara getirmiştir.

Bu çalışmada yatay toprak kaynaklı ısı pompasının Sivas ili için ısıtma ve soğutma performansı araştırılmıştır. Isıtma performansı için Aralık ve soğutma performansı için Haziran ayına ait veriler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarla ısı pompası uygulamasının performans analizi yapılarak Sivas ili için uygunluğunun belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. DENEYSEL SİSTEM (EXPERIMENTAL SETUP)

Deney sistemine ait ısı pompası kurulumu, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi kampüsü içerisinde yer alan Enerji Evi olarak adlandırılan öncesinde farklı tez çalışmalarının yapıldığı 30 m² taban alanı üzerine inşa edilmiş bina için gerçekleştirilmiştir. Sistemi toprak, ısı pompası ve radyatör devresi olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır. Sistem devresinin fotoğrafı ve şematik gösterimi Şekil 1 'de verilmiştir.



Şekil 1. Deney sistemine ait fotoğraf ve şematik gösterim (Photo and schematic view of experimental system)

Şekil 1 'de verilen numaralar sırasıyla, 1 Isı pompası, 2 Sirkülasyon pompası, 3 Manometreler, 4 Genleşme tankı, 5 Akümülyasyon tankını göstermektedir. Benzer olarak şematik gösterimdeki A akümülyasyon tankını, C kompresörü, B/Y ısıtma modunda buharlaştırıcı, soğutma modunda ise yoğuşturucu ve V kısılma vanasını sembolize etmektedir. Sisteme ait sıcaklık, basınç, debi ve elektrik gücü değerleri kayıt altına alınmaktadır. Sistemin ısıtma/soğutma modu geçişleri dört yollu vana ile sağlanmıştır.

Enerji evi olarak adlandırılan üç odalı yapının toplam 51.3 m³ hacme sahip iki odası için ısıtma/soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sistemin radyatör devresi iki odada pencere önlerine yerleştirilmiş 22-PKKP/600 tipinde 1.5 m ve 1.6 m olmak üzere toplam 3.1 m uzunluğunda radyatörlerden meydana gelmektedir.

Toprak devresi 6×27 m taban alanına sahip 2.5 m derinlikte açılan çukura yerleştirilmiş 370 m uzunluğunda 10 atü işletme basıncına dayanıklı PE100 (polietilen) borudan oluşmaktadır (Şekil 2a). Literatürde yer alan çalışmalar incelenerek döşeme alanı ve boru uzunluğu [16] hesaplanmış ve Sivas iklim şartlarına göre uygun tip ve uzunluk belirlenmiştir. Sistemde kullanılan ısı pompası Restherma markasına ait IP11SS modeli (Şekil2b) olup, cihazın teknik özellikleri Çizelge 1 'de verilmiştir.

Çizelge 1. Isı pompası teknik değerleri (Technical values of heat pump)

| | | |
|---------|-------------------------------|---------|
| ISITMA | Nominal kapasite | 10.5 kW |
| | COP | 5 |
| | Maksimum çıkış suyu sıcaklığı | 55 °C |
| SOĞUTMA | Nominal kapasite | 8.5 kW |
| | EER | 4.29 |
| | Maksimum çıkış suyu sıcaklığı | 7 °C |
| | Soğutucu akışkan | R410a |
| | Kompresör tipi | Scroll |



Şekil 2. Isı pompasına ait a) toprak devresi b) ısı pompası ünitesi (Heat pump cycle of a) ground b) heat pump unit)

Deneylerde ısıtma eleman çiftleri ile iç ortam sıcaklığı, dış ortam sıcaklığı, 0.5 m ile 2.5 m derinlikleri arası toprak sıcaklıkları, ısıtma suyu sıcaklıkları, soğutucu akışkan sıcaklıkları ve salamura sıcaklıkları ölçülmüştür. Isıtma performansı için kullanılan veriler Aralık ayında [8],

soğutma performansı için kullanılan veriler ise Haziran ayında kaydedilmiştir.

Belirsizlik analizinin belirlenmesi açısından deneysel sistemde kullanılan başlıca ölçüm cihazları için hassasiyet değerleri şu şekilde verilebilir: Hacimsel debi $\pm\%3.36$, ısı eleman çiftleri $\pm\%1.43$, kompresör basıncı $\pm\%4.55$ ve güç değerleri için $\pm\%1.02$. Belirsizlik analizi, birçok çalışmada kullanılan Holman tarafından tanımlanan yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir [17].

3. HESAP YÖNTEMİ (CALCULATION METHOD)

3.1 Isıtma Modu (Heating Mode)

Yapılan çalışma için hesap yöntemi ısıtma ve soğutma modu olarak iki kısma ayrılmıştır. Isıtma modu için topraktan çekilen ısı;

$$\dot{Q}_t = \dot{m}_s * C_s * (T_{s,g} - T_{s,\phi}) \quad (1)$$

olup burada s salamura, g giriş ve ϕ çıkış değerini sembolize etmekte ayrıca debi, özgül ısı ve buharlaştırıcı giriş/çıkış sıcaklıkları sırasıyla verilmektedir. Yoğuşturucuda ısıtma suyuna aktarılan ısı:

$$\dot{Q}_y = \dot{m}_{R410A} * (h_{y,g} - h_{y,\phi}) \quad (2)$$

Isı pompasının performans katsayısı:

$$COP_{IP} = \dot{Q}_y / \dot{W}_{komp} \quad (3)$$

Sistemin performans katsayısı:

$$COP_S = \dot{Q}_y / \dot{W}_{top} \quad (4)$$

$$\dot{W}_{top} = \dot{W}_{komp} + \dot{W}_{sp} \quad (5)$$

3.1 Soğutma Modu (Cooling Mode)

Toprağa atılan ısı:

$$\dot{Q}_t = \dot{m}_s * C_s * (T_{s,\phi} - T_{s,g}) \quad (6)$$

Buharlaştırıcıda sudan çekilen ısı:

$$\dot{Q}_b = \dot{m}_{R410A} * (h_{b,\phi} - h_{b,g}) \quad (7)$$

Isı pompasının performans katsayısı:

$$COP_{IP} = \dot{Q}_b / \dot{W}_{komp} \quad (8)$$

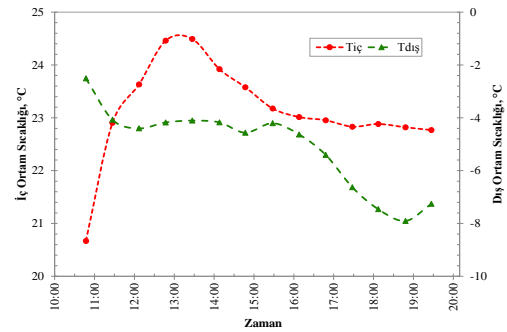
Sistemin performans katsayısı:

$$COP_S = \dot{Q}_b / \dot{W}_{top} \quad (9)$$

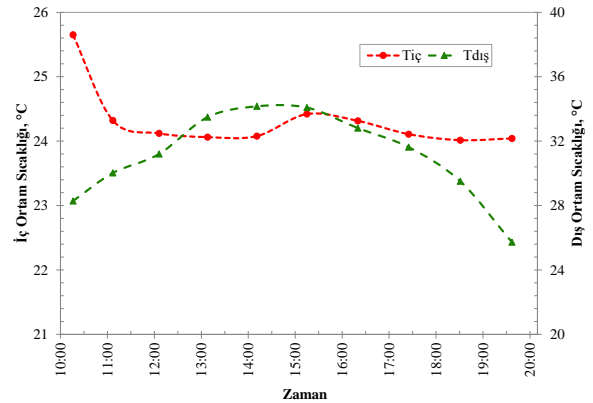
$$\dot{W}_{top} = \dot{W}_{komp} + \dot{W}_{sp} \quad (10)$$

4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (DISCUSSION OF RESULTS)

Bu çalışmada Sivas ilinde kış ve yaz aylarında gerçekleştirilen ölçümlerde; ısıtma için tipik bir kış günü olan 16 Aralık ve soğutma için ise 29 Haziran tarihlerinde elde edilen değerler kullanılmıştır. Sivas ili iklim özellikleri göz önünde bulundurularak seçilen Aralık/Haziran günleri; toprak kaynaklı ısı pompası uygulamasının kış ve yaz sezonuna ait davranış özelliklerini sergilemesi amaçlanmıştır. İlk olarak iç ve dış ortam sıcaklıklarının değişimleri ısıtma ve soğutma modu için verilmiştir (Şekil 3). Isıtma gününde yapılan ölçümlerde en düşük iç ve dış ortam sıcaklıkları sırasıyla 20.67 °C ve -7.90 °C olurken en yüksek iç ve dış ortam sıcaklıkları 24.49 °C ve -2.51 °C olmuştur. Soğutma günü için yapılan ölçümlerde en düşük iç ve dış ortam sıcaklıkları sırasıyla 24.02 °C ve 25.72 °C olurken en yüksek iç ve dış ortam sıcaklıkları 26.65 °C ve 34.16 °C olmuştur.



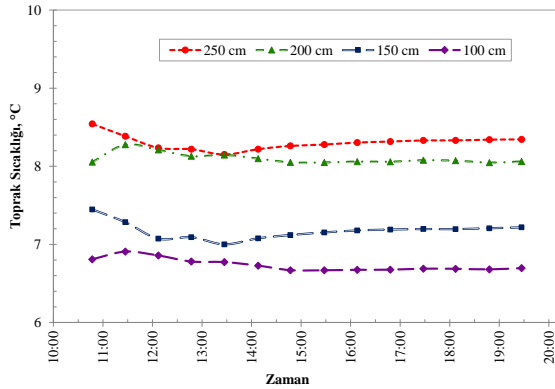
a)



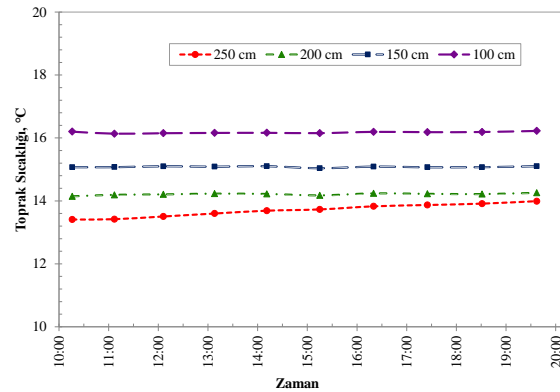
b)

Şekil 3. İç ve dış ortam sıcaklıklarının zamana göre değişimi a) ısıtma b) soğutma (Change of indoor and outdoor temperatures by time a) heating b) cooling)

Yapılan deneysel çalışmada toprak sıcaklıkları 4 farklı derinlikte ölçülmüş olup, bu ölçümlere ait değerler Şekil 4 'te gösterilmiştir. Derinlik arttıkça toprak sıcaklığının da arttığı ısıtma modu için açıkça görülmektedir. Bu değer 2.5 m derinlikte en yüksek 8.54 °C ve 1 m derinlikte en düşük 6.69 °C olarak ölçülmüştür. Soğutma modu için bu durum terse dönerek 2.5 m derinlikte en düşük 13.41 °C ve 1 m derinlikte en yüksek 16.23 °C olarak ölçülmüştür.



a)

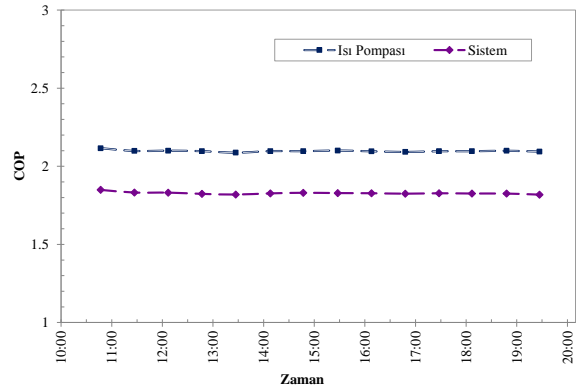


b)

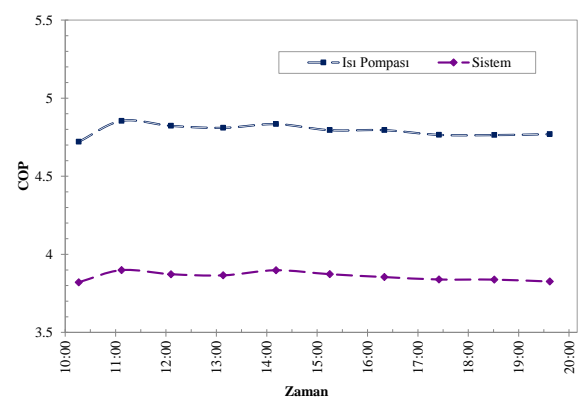
Şekil 4. Farklı derinliklerdeki toprak sıcaklıklarının zamana göre değişimi a) ısıtma b) soğutma (Change of soil temperatures by time at different depths a) heating b) cooling)

Ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak ısı pompası ve sistemin performans katsayısı değerleri ısıtma ve soğutma modu için hesaplanmıştır (Şekil 5). Isıtma gününde ısı pompasına ait performans katsayısı değeri ortalaması (COP_{IP}) 2.10 ve sisteme ait performans katsayısı değeri (COP_{SIS}) ise ortalama 1.83 olarak elde edilmiştir. Performans katsayısı değerleri soğutma modunda ise ısı pompası için ortalama 4.79 (4.72-4.85 aralığında) ve sistem için ortalama 3.86 (3.82-3.90) olarak hesaplanmıştır.

Sivas ili iklim şartlarına benzer özelliklere sahip olan Erzurum ilinde yapılan çalışmada aralık ayı boyunca ısı pompasının ve sistemin günlük ortalama performans katsayılarını sırasıyla 2.4 ve 2.1 olarak hesaplamıştır [18]. Ankara ilinde soğutma mevsimi için yapılan çalışmada ise ısı pompasının performans katsayısı COP_{IP} ve sistemin COP_{SIS} değerleri ise sırasıyla 3.12 ve 2.81 olarak hesaplanmıştır [3]. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda mevcut çalışmada ısıtma için elde edilen sonuçların çok yakın olduğu, soğutma için ise daha yüksek sonuçlar elde edildiği görülmüştür.



a)



b)

Şekil 5. Performans katsayısı değerlerinin zamana göre değişimi a) ısıtma b) soğutma (Change of coefficient of performance values by time a) heating b) cooling)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION and SUGGESTIONS)

Yatay toprak kaynaklı ısı pompasının Sivas ili için ısıtma ve soğutma performansının araştırıldığı deneysel çalışmada; ısıtma performansı için Aralık ayı ve soğutma performansı için Haziran ayına ait birer günlük veriler kullanılmıştır. Böylece ısı pompası uygulamasının Sivas ili için tipik kış ve yaz sezonu iklim özelliklerinin sergilenmesi amaçlanmıştır.

Deneysel çalışmada iki odadan oluşan toplam 51.3 m³ hacme ısı pompası uygulaması yapılmış ve ölçülen verilerden ısıtma modunda ortalaması performans katsayısı değerleri ısı pompası ve sistem için sırasıyla 2.10 ve 1.83, soğutma modunda ise ısı pompası için ortalama 4.79 ve sistem için ortalama 3.86 olarak hesaplanmıştır. Ülkemizin 4. derece gün bölgesinde bulunan Sivas ili için 2.5 m derinlikte elde edilen performans katsayısı değerleri gerek ısıtma gerekse soğutma modunda tatmin edici aralıklardadır. Ayrıca ısı pompası için ısıtma güç tüketimi ortalama değeri 2.83 kW, soğutma güç tüketimi ortalama değeri 1.69 kW olarak elde edilmiştir.

Sivas ili ısı pompası uygulamasının yatay olarak uygulanması sonucu elde edilen değerlerin umut vaat edici olması gelecek çalışmalarda düşey tip ısı pompası kullanımına teşvik etmektedir. Elde edilen performans katsayısı değerleri ve benzer iklim bölgesinde yapılan çalışmalar da göz önüne alındığında düşey ısı pompası performans katsayısı değerlerinin yataya göre daha yüksek olacağı ön görülmektedir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

| | |
|-------------------|---|
| \dot{Q} | : Çekilen/atılan ısı [kW] |
| c | : Özgül ısı [kJ/kg °C] |
| \dot{m}_s | : Salamuranın debisi [kg/s] |
| $T_{s,g}$ | : Salamuranın buharlaştırıcı/yoğuşturucu giriş sıcaklığı [°C] |
| $T_{s,\phi}$ | : Salamuranın buharlaştırıcı/yoğuşturucu çıkış sıcaklığı [°C] |
| \dot{m}_{R410A} | : Soğutucu akışkanın kütleli debisi [kg/s] |
| $h_{y,g}$ | : Yoğuşturucu girişinde soğutucu akışkanın entalpisi [kJ/kg] |
| $h_{y,\phi}$ | : Yoğuşturucu çıkışında soğutucu akışkanın entalpisi [kJ/kg] |
| $h_{b,\phi}$ | : Buharlaştırıcı çıkışında soğutucu akışkanın entalpisi [kJ/kg] |
| $h_{b,g}$ | : Buharlaştırıcı girişinde soğutucu akışkanın entalpisi [kJ/kg] |

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Benli H., "A performance comparison between a horizontal source and a vertical source heat pump systems for a greenhouse heating in the mild climate Elazığ, Turkey", *Applied Thermal Engineering*, 50: 197-206, (2013).
- [2] Naili N., Hazami M., Kooli S., Farhat A., "Energy and exergy analysis of horizontal ground heat exchanger for hot climatic condition of northern Tunisia", *Geothermics*, 53: 270-280, (2015).
- [3] Özdemir M. B., Özkaya M. G., "Ankara ili şartlarında düşey tip toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin enerji ve ekserji analizi", *Politeknik Dergisi*, 18 (4): 269-280, (2015).
- [4] Luo J., Rohn J., Bayer M., Priess A., Wilkmann L., Xiang W., "Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany", *Geothermics*, 53: 57-66, (2015).
- [5] Zhai X.Q., Cheng X.W., Wang R.Z., "Heating and cooling performance of a minitype ground source heat pump system", *Applied Thermal Engineering*, 111: 1366-1370, (2017).
- [6] Mao Q., Chen Y., "Experimental investigation of thermal performance of a ground source heat pump system for spring season", *Energy and Buildings*, 152: 336-340, (2017).
- [7] Lu Q., Narsilio G. A., Aditya G. R., Johnston I.W., "Economic analysis of vertical ground source heat pump systems in Melbourne", *Energy*, 125: 107-117, (2017).
- [8] Caner M., "Yatay Tip Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Sivas Şartlarında Değerlendirilmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2018).
- [9] Caner M., Duman N., Buyruk E., Kılınç F., "Experimental investigation of the performance of a horizontal ground source heat pump", *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 9 (6): 1606-1609, (2018).
- [10] Esen H., "Düşey borulu toprak kaynaklı ısı pompasının konut iklimlendirme sistemlerinde mevsimlik davranışının araştırılması", *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).
- [11] Ekinci D. A., "Erzurum'da mahal ısıtma amaçlı kullanılan toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin deneysel incelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).
- [12] Bakırcı K., Çomaklı K., Özyurt Ö., Yılmaz M., "Güneş destekli ısı pompasının enerji ve ekserji analizi", *Mühendis ve Makina Dergisi*, 50 (590): 26-32, (2009).
- [13] Pulat E., Coskun S., Unlu K., Yamankaradeniz N., "Experimental study of horizontal ground source heat pump performance for mild climate in Turkey", *Energy*, 34(9): 1284-1295, (2009).
- [14] Öztürk M., "Toprak kaynaklı ısı pompalarında toprak neminin ısı pompasının enerji tüketimine etkisi", *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2015).
- [15] <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=SIVAS>.
- [16] Yoldaş, T., Durmaz, Ş., "Isı pompası sistemleri ve toprak kaynaklı bir ısı pompasının bir villaya uygulanması", *TTMD Dergisi*, 55: 31-38, (2008).
- [17] Holman J.P., "Experimental methods for Engineers", *McGraw-Hill Education*, 739s. (1994).
- [18] Çolak, D., "Toprak kaynaklı ısı pompasının performans analizi", *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Alternatif gerilim uygulanan betonlarda s/ç oranının ve hiperakışkanlaştırıcı oranının priz bitiş süresi ve basınç dayanımına etkilerinin araştırılması

Investigation of the impacts of w/c ratio and hyper plasticizer ratio on final setting time and compressive strength for the concretes to which alternating current applied

Yazar(lar) (Author(s)): İsmail HOCAOĞLU¹, Tayfun UYGUNOĞLU²

ORCID¹: 0000-0001-9294-1120

ORCID²: 0000-0003-4382-8257

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Hocaoğlu İ., Uygunoğlu T., “Alternatif gerilim uygulanan betonlarda s/ç oranının ve hiperakışkanlaştırıcı oranının priz bitiş süresi ve basınç dayanımına etkilerinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1045-1051, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.480915

Alternatif Gerilim Uygulanan Betonlarda S/Ç Oranının ve Hiperakışkanlaştırıcı Oranının Priz Bitiş Süresi ve Basınç Dayanımına Etkilerinin Araştırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

İsmail HOCAOĞLU*, Tayfun UYGUNOĞLU

Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 09.11.2018 ; Kabul/Accepted : 06.02.2019)

ÖZ

Bu çalışmada su/çimento oranları 0.45, 0.55, 0.65 ve 0.70 olan 300 dozajlı betonlara 80 V AC gerilim uygulanmıştır. S/ç oranları 0.55 olan % 0.5, % 1 ve % 1.5 oranlarında hiperakışkanlaştırıcı konulan betonlar üretilmiştir. Taze haldeki betonlar elektriksel yalıtımlı 10cm x 10cm x 35cm boyutlarındaki kalıplar içerisinde elektrik akımı uygulanmış, ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır. Elektrik akımı uygulanmış ve elektrik akımı uygulanmamış numunelerde iç sıcaklık ölçümü ile priz bitiş süresi belirlenmiştir. Alternatif gerilimin, s/ç oranının ve hiperakışkanlaştırıcı oranının priz sona erme süresi, 1 günlük basınç dayanımı ve 28 günlük basınç dayanımına etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada betona belirli oranda hiperakışkanlaştırıcı konulması ve alternatif gerilim uygulaması sonucu priz bitiş süresinin kısaltılması amaçlanmıştır. Betonlara az miktarda (% 0.5) hiperakışkanlaştırıcı konulması ve 80 V AC gerilim uygulaması ile ciddi basınç dayanım kaybı yaşanmadan priz süresinin kısaltılabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alternatif gerilim, beton, priz bitiş süresi.

Investigation of the Impacts of W/C Ratio and Hyper Plasticizer Ratio on Final Setting Time and Compressive Strength for the Concretes to which Alternating Current Applied

ABSTRACT

In this study, 80 V AC current is applied to 300 dosaged concretes whose water/cement ratios are 0.45, 0.55, 0.65 and 0.70. Admixtures having different hyper plasticizer ratios (0.5 %, 1 % and 1.5 %) and admixtures having constant water/cement ratio (0.55) at 300 dosaged levels were prepared. Electrical current was applied to the fresh concretes in the electrically isolated molds whose sizes are 10cm x 10cm x 35cm. The measurements were done at room temperature. As a result of measuring internal temperatures of concretes, the differences between final setting time with and without electric current application on the specimens were investigated. The effects of Alternating Current (AC), water/cement ratio, hyper plasticizer ratio on final setting time, 1 day compressive strength and 28 day compressive strength are investigated. It is aimed to shorten the duration of final setting time through adding hyper plasticizer in a certain rate to the concrete and application of AC current. As a result, adding little hyper plasticizer (0.5 %) and application of 80 V AC electrical current to the concretes shorten the setting time without critical compressive strength loss.

Keywords: Alternating voltage, concrete, final setting time

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde deney tekniklerinin ve teknolojinin laboratuvarında meydana getirdiği ilerlemeler neticesinde betonun mekanik yapısını da geliştirmiştir. Betonun basınç dayanımını erken belirleme bir hazır beton tesisinin dayanımı ve ekonomisi açısından önemlidir. Dayanımı erken belirlemenin bir yolu, dayanım gelişimini hızlandırmaktır. Seri üretim gerektiren hazır beton tesislerinde beton dayanımının erkenden hedeflenen düzeye ulaşması projenin öngörülen zamanda gerçekleştirilebilmesi açısından önem arz

etmektedir. Uygulanan yöntemlerde başarı derecesini etkileyen faktörler arasında ısı işlemi belirleyen parametrelerin alacağı değerler kadar betonun geleneksel bileşenlerine ek olarak konulan katkı maddelerinin tipi ve miktarının da önemli payı bulunmaktadır [1]. Bu maddelerin hem bileşimlerinin hem de betona ilave oranlarının farklı olması betonun performansı açısından olduğu kadar dayanım gelişimi üzerinde de etkili olmaktadır. Bu etki, hızlandırılmış kür uygulandığında daha da belirgin olmaktadır [2].

Yapılan bir çalışmada çimento pastalarındaki su/bağlayıcı oranı, çimento hidrasyon alkali etkisi ve çimento pastasının akışkanlığı araştırılmıştır [3-4]. Su/bağlayıcı oranıyla elektriksel direnç karşılaştırılarak,

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : afyonbeton@hotmail.com

elektriksel direnç arttıkça, ısı artışı olacağı tahmin edilmiştir.

Taze haldeki betondaki akım ilerlemesinin mikro yapı özellikleri üzerindeki etkileri hakkında çalışmalar yapılmıştır [5]. Mikro yapıda yapılan araştırmalar ile betondaki akım etkisinin durumu, maddenin kimyasal kompozisyonlardaki değişimi, elektrik özelliği hakkında tahminler yapılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Ghoddousi vd. [6] çimento pastalarında; elektriksel direnç ile kalsiyum hidroksit (CH) arasında ilişki olup olmadığını araştırmışlardır. Sonuç olarak çimento pastalarında elektriksel ölçüm ile, CH içeriğinin belirlenmesinde bir model geliştirmişlerdir.

Yapılan çalışmalarda kür sıcaklığına göre, katkılı çimentonun priz süresinin değişiklik gösterdiği ortaya çıkmıştır. Elektrik iletkenliğinin çeşitliliği ve onun zamana göre türevi, çimento pastasının mikro yapısal gelişiminde farklı aşamalarla ilişkilendirilebileceği tahmin edilmiştir [7].

Uygunoğlu vd. [8] farklı boyutlu çimento esaslı harçlara 7.5, 15, 22.5 ve 30 V DC gerilim uygulamış, uygulanan gerilim şiddetinin artması ve plakalar arası mesafenin kısılması ile priz süresinin kısaltılabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Yapılan bir diğer araştırmada su/bağlayıcı oranları farklı olarak hazırlanmış çimento pastalarına belirli oranda Kalsiyum Sülfü Alüminat (CSA) katılarak, çimento pastalarındaki elektriksel özdirençleri 1 gün süreyle araştırılmıştır. Karıştırıldıktan hemen sonra elektriksel özdirenç zamanla arttığı gözlenmiştir. Daha sonra prizini alıncaya kadar 2 kez en yüksek değere ulaştığı görülmüştür. Son olarak yaklaşık 1440 dakikada elektrik akım geçişi en düşük değerlere ulaşmıştır. Hidratasyonun ilk aşamasında çimento pastalarındaki elektriksel özdirençte porozite en önemli rolü oynarken, daha sonra iyon transferi önemli rol oynamıştır. Elektriksel özdirenç ve su/bağlayıcı oranı arasında ilk bir saatte olumsuz eğilim varken, 24 saat sonunda aslında elektrik özdirençle su/bağlayıcı oranı arasında ilişki

kurulabileceği ortaya çıkmıştır. Farklı su/bağlayıcı oranlarında hazırlanmış karışımlar için, 24 saat sonunda elektrik özdirençle basınç dayanımı arasında ilişki olmadığı ortaya çıkmıştır [9].

Yim vd. [10] çimento pastası ve çimento esaslı harçların priz sona erme süresine kadar elektriksel iletkenlik özelliği gösterdiğini, priz sona erme süresi sonrasında ise elektriksel direncin en yüksek değerlere ulaştığını, hidratasyon ile priz süresi arasında ilişki olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bilindiği gibi çimento pastasındaki hidratasyon ürünleri C-S-H jelleri, etrenjit ve diğer bileşenlerden oluşmaktadır. Hidratasyon süresince sertleşen çimento esaslı kompozitlerin kapiler boşlukları gittikçe hidratasyon ürünleriyle dolmakta ve mikro yapının sıvı fazının dayanımı artmaktadır. Daha sonra çimento esaslı malzemenin elektriksel direnci artmaktadır [11].

Topçu vd. farklı su/çimento oranlarına sahip (0.40, 0.45, 0.50, 0.55) ve mineral katkılı çimento pastalarına elektrik akımı uygulamışlar, çimento pastalarına hem mineral katkı konması hem de elektrik akımı uygulanması ile priz süresinin kısaltılabileceğini belirlemişlerdir [12-13].

Bu çalışmada alternatif gerilimin, s/ç oranının ve hiperakışkanlaştırıcı oranının priz sona erme süresi, 1 günlük basınç dayanımı ve 28 günlük basınç dayanımına etkileri araştırılmıştır. Farklı s/ç oranlarına sahip betonlarda belirli oranlarda hiperakışkanlaştırıcı konulması ve AC gerilim uygulaması neticesinde priz bitiş süresinin kısaltılması hedeflenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

2.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri (Material used and their properties/features)

Betonların hazırlanmasında çimento olarak Afyon Çimento Sanayi Fabrikasının üretimi olan TS EN 197-1'e uygun CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır [14]. Çimentonun içerisindeki C₃S, C₂S, C₃A ve C₄AF ana bileşenleri oranları sırasıyla % 60.11, % 11.02, % 6.97 ve

Çizelge 1. Çimento fiziksel ve kimyasal özellikleri (Physical and chemical features of cement)

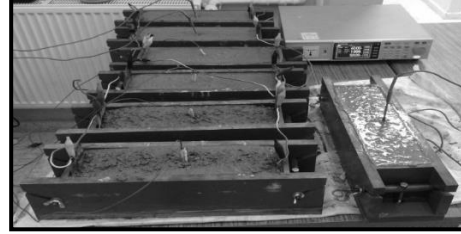
| İçerik, % | CEM I 42.5 R |
|--------------------------------|--------------|
| CaO | 63.6 |
| SiO ₂ | 19.6 |
| Al ₂ O ₃ | 4.72 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.27 |
| MgO | 1.91 |
| Na ₂ O | 0.34 |
| K ₂ O | 1.06 |
| SO ₃ | 4.72 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.04 |
| TiO ₂ | 0.41 |
| KK | 2.69 |
| Özgül ağırlık | 3.07 |
| İncelik, cm ² /g | 3312 |

%9.95'tir. Portland çimentosunun priz başlama ve priz sona erme süreleri ise sırasıyla 182 ve 330 dakikadır.

2.2. Numune Üretimi ve Yapılan Deneyler (Production of specimen and the experiments conducted)

Beton üretimi 300 dozajlı; 0.45, 0.55, 0.65 ve 0.70 su/çimento oranında tasarlanmış olup, kapasitesi yaklaşık 250 lt olan beton mikseri ile gerçekleştirilerek 10cm x 10cm x 35cm boyutlarındaki plastik prizma kalıplar vasıtasıyla numuneler üretilmiştir. Birim hacimdeki bileşen miktarları Çizelge 2' de verilmiştir. Karışım hesapları agreganın doygun yüzey kuru ağırlıkları belirlenerek hazırlanmıştır. Kumun ve agreganın özgül ağırlıkları sırasıyla 2,67 ve 2,70 olarak belirlenmiştir. Kırma kum (0-4mm) ve agregası (4-11,2mm) yarı yarıya karıştırılarak standartlara uygun ideale en yakın karışım elde edilmiştir (Şekil 1).

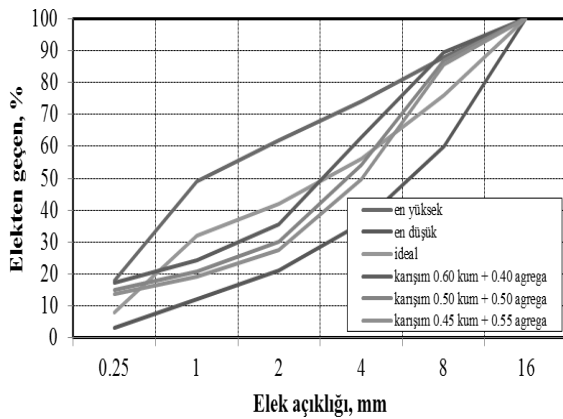
çalıştırılmıştır. Betonlar kalıplara döküldükten hemen sonra betonların iç sıcaklıklarını ölçmek amacıyla betonların içlerine K tipi sıcaklık ölçer (termokopl) saplanmış, veri kaydedici kullanılarak her 10 dakikada bir betonların iç sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Hazırlanan deney düzeneği Resim 1' de gösterilmiştir.



Resim 1. Elektrik akımı uygulanmış betonların görünüşü (A view of concretes to which electrical current applied)

Çizelge 2. Birim hacimdeki beton bileşenleri (Component of concrete per cubic meter)

| S/ç | Çimento, kg | Su, (lt) | Kırma Kum (0-4mm), kg | Agregası (4-11.2mm), kg | Hiper Akış, lt | B.H.A, t/m ³ |
|------|-------------|----------|-----------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|
| 0.45 | 300 | 135 | 955 | 968 | - | 2,35 |
| 0.55 | 300 | 165 | 915 | 928 | - | 2,38 |
| 0.65 | 300 | 195 | 875 | 887 | - | 2,25 |
| 0.70 | 300 | 210 | 855 | 867 | - | 2,23 |
| 0.55 | 300 | 165 | 904 | 922 | 15 | 2,30 |
| 0.55 | 300 | 165 | 904 | 921 | 30 | 2,30 |
| 0.55 | 300 | 165 | 904 | 921 | 45 | 2,30 |



Şekil 1. Elek analizi ile agregaların tane büyüklüğü dağılımının ve karışım oranının belirlenmesi (Determination of the particle size distribution of aggregates and mixture ratio by sieving analysis)

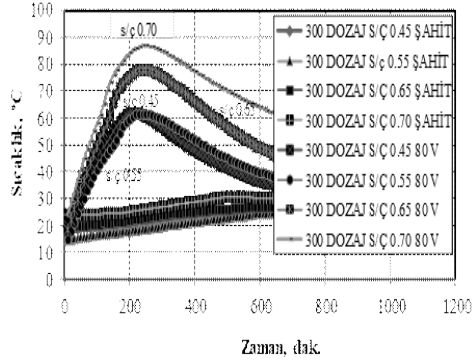
Hazırlanan betonlar 10cm x 10cm x 35cm boyutlarındaki kalıplara yerleştirildikten hemen sonra AC güç kaynağı vasıtasıyla gerilim uygulanmıştır. Betonlar üzerine gerilim uygulayabilmek amacıyla kalıpların uç kısımlarına temas edecek şekilde bakır levhalar yerleştirilmiştir. AC güç kaynağının pozitif kutbu bu levhalardan bir tanesine, negatif kutbu da diğer bakır levhaya bağlanarak AC güç kaynağı 24 saat süresince

3. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

3.1. S/Ç Oranının Priz Bitiş Süresine Etkisi (The impact of hyper plasticizer ratio on final setting time)

Önceki yapılan çalışmalarda çimento esaslı malzemelerde iç sıcaklık ölçümü ile priz bitiş süresinin tahmin edilebileceği belirlenmiştir [15]. Çimento esaslı malzeme içine yerleştirilmiş olan iki elektrot arasındaki akım geçişi ilk olarak sıvı fazda bulunan su aracılığı ile gerçekleşmektedir. Hidratasyonun ilk aşamalarında tüm boşluklar birbiriyle bağlantılıdır. Bu nedenle elektrotlar arasındaki elektroliz olayı boşluklarda bulunan su ile doğru orantılı olmaktadır [16]. Hidratasyon ürünlerinin oluşması için elektrik akımının iletilmesi karışımlardaki boşluklarda bulunan serbest suyun kimyasal reaksiyonları ile meydana gelmektedir. Bu nedenle su/çimento oranının artmasıyla hidrolik reaksiyonları hızlanmaktadır. Çimento esaslı malzemenin hidratasyonun ilk aşamalarındaki elektriksel iletkenlik kabiliyetleri su/çimento oranı arttıkça artmaktadır [17]. Hidratasyonun ilk aşamasında elektrik akımı taşıma kapasitesine sahip Ca²⁺, OH⁻, SO₄²⁻ ve alkali iyonları çok az olması sebebiyle elektriksel öz direnç en düşük değerleri almaktadır [18]. Çimento esaslı malzemelerde iyonik konsantrasyonun azalmasıyla iyonik birleşme meydana gelmektedir. Bu iyonik birleşmeler neticesinde

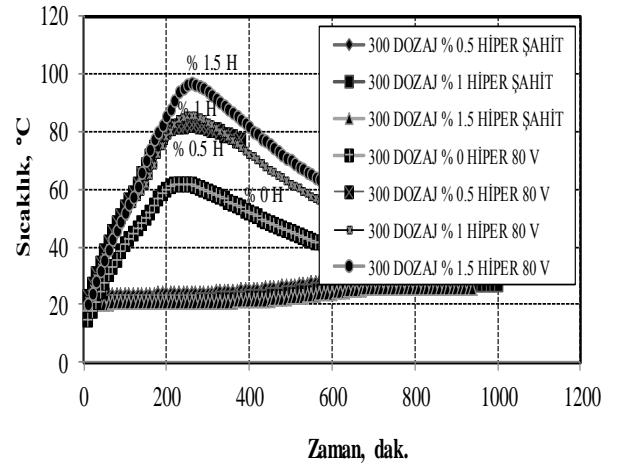
elektriksel öz direnç artarak priz alma olayı meydana gelmektedir. S/ç ve elektrik akımının priz süresine etkisini araştırmak amacıyla farklı s/ç oranlarına sahip betonların hidrasyon süresine göre beton iç sıcaklıkları ölçülmüştür. S/ç oranı sırasıyla 0.45, 0.55, 0.65 ve 0.70 olan referans betonların sıcaklık ölçümü ile priz sona erme süreleri 630, 690, 660 ve 500 dakika olarak belirlenmiştir (Şekil 2). S/ç oranları 0.45, 0.55, 0.65 ve 0.70 olan betonlara 80 V AC gerilim uygulaması ile priz süreleri referans betonlara göre sırasıyla 420, 450, 420 ve 270 dakika daha erken olmuştur.



Şekil 2. 300 Dozajlı farklı s/ç içeriğine sahip betonda sıcaklık-zaman ilişkisi (Internal temperatures of 300 dosaged concretes depending upon stress intensity and water/cement ratio)

3.2 Hiperakışkanlaştırıcı Oranın Priz Bitiş Süresine Etkisi (The impact of hyper plasticizer ratio on final setting time)

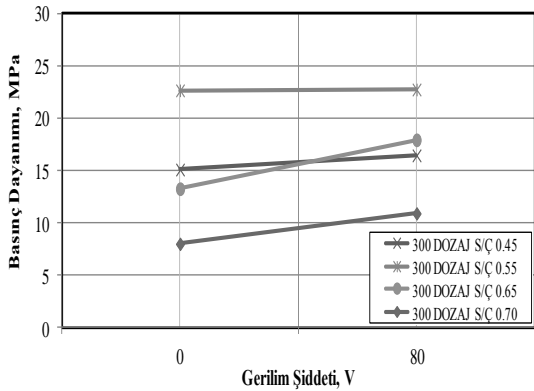
300 dozajlı gerilim uygulanmayan ve sırasıyla % 0.5, % 1 ve % 1.5 oranlarında hiperakışkanlaştırıcı konulan betonların priz sona erme süreleri sırasıyla 630, 700, 740 ve 770 dakika olarak belirlenmiştir (Şekil 3). Beton içerisine % 0' dan % 1.5' e kadar hiperakışkanlaştırıcı konulması ile priz sona erme süresi referans betonlara göre yaklaşık 140 dakika daha sonra gerçekleşmiştir. 300 dozajlı s/ç oranı 0.55 olan; sırasıyla % 0, % 0.5, % 1 ve % 1.5 oranlarında hiperakışkanlaştırıcı konulan betonlara 80 V AC gerilim uygulandığında priz sona erme süreleri 260. dakikada gerçekleşmiştir. Gerilim uygulanan betonlarda beton içine katılan hiperakışkanlaştırıcı oranı arttıkça priz sona erme süreleri aynı sürede çıkmış olsa da şahit numunelerine göre daha kısa sürede priz sonlandığı görülmüştür. Buradan beton içine hem hiperakışkanlaştırıcı katılması hem de gerilim uygulaması ile kür süresinin kısaltılabileceği belirlenmiştir.



Şekil 3. 300 Dozajlı % 0, % 1, % 1.5 hiperakışkanlaştırıcı betonda sıcaklık-zaman ilişkisi (Internal temperatures of 300 dosaged concretes depending upon stress intensity and hyper plasticizer 0, 1 and 1.5 % ratio)

3.3 S/ç Oranın 1 Günlük Basınç Dayanımına Etkisi (The impact of water/cement ratio on 1 day compressive strength)

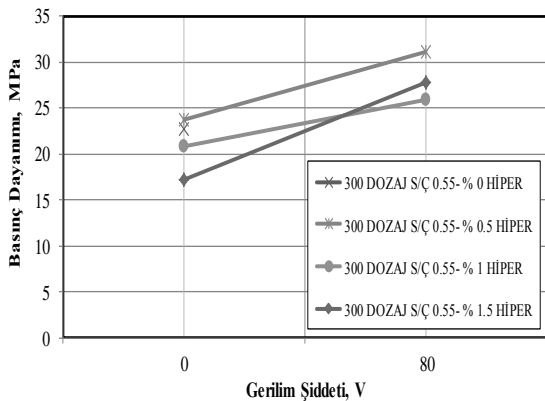
S/ç oranının 1 günlük basınç dayanımına etkisini araştırmak amacıyla 300 dozajlı s/ç oranları sırasıyla 0.45, 0.55, 0.65 ve 0.70 oranlarına sahip betonlara 0 V ve 80 V AC gerilim uygulanmıştır. Gerilim uygulanmayan betonlarda s/ç oranı arttıkça 1 günlük basınç dayanımında düşüşler gözlenmiştir. S/ç oranı 0.45 olan betonun 1 günlük basınç dayanımı gerilim uygulanması sonucu % 9.01 artmıştır. Hem gerilim uygulanan hem de gerilim uygulanmayan betonlarda s/ç oranı 0.55 olan betonlardaki 1 günlük basınç dayanımı diğer s/ç oranlarındaki betonlara göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durum s/ç oranı 0.55 olan betonun hem maximum iç sıcaklığının en düşük değere (61.8 °C) sahip olması hem de s/ç oranı 0.55 olan betonun işlenebilirliğinin daha iyi olması sebepleriyle açıklanabilir. Ancak; s/ç oranı 0.55 olan betonlarda gerilim uygulanması sonucu basınç dayanımı yalnızca % 0.36 artmıştır. Su/çimento oranı 0.65 olan betonlarda ise 1 günlük basınç dayanımı gerilim uygulanmayan betonlara göre fark edilebilir derecede artmıştır (Şekil 4). Buradan gerilim uygulaması ile 1 günlük basınç dayanımını arttırmak için 0.65 gibi yüksek oranda s/ç oranına sahip beton üretilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Ancak; daha yüksek s/ç oranlarında (0.70) 1 günlük basınç dayanımının çok düşük değer alması nedeniyle uygun olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4. S/ç oranının ve AC gerilimin 1 günlük basınç dayanımına etkisi (The impact of water/cement ratio and AC current on 1 day compressive strenght)

3.4. Hiperakışkanlaştırıcı Oranının 1 Günlük Basınç Dayanımına Etkisi (The impact of hyper plasticizer ratio on 1 day compressive strenght)

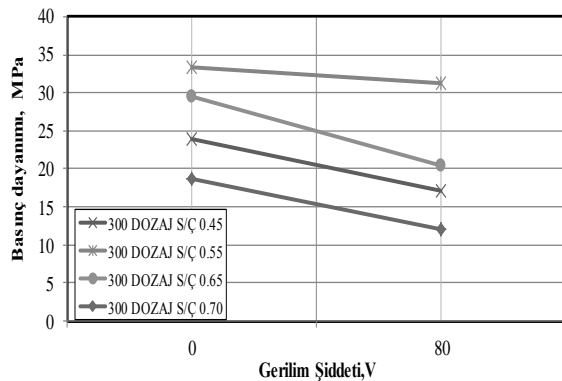
Hiperakışkanlaştırıcı oranının 1 günlük basınç dayanımına etkisini araştırmak amacıyla 300 dozajlı s/ç oranları 0.55 olan, % 0, % 0.5, % 1 ve % 1.5 oranlarında hiperakışkanlaştırıcı konulan betonlar üretilmiştir. Gerilim uygulandığında 1 günlük basınç dayanımını araştırmak amacıyla aynı içerikli betonlar üretilerek 80 V AC gerilim uygulanmıştır. Gerilim uygulanmayan betonlarda genel olarak karışım içindeki hiperakışkanlaştırıcı oranı arttıkça basınç dayanımında düşüşler gözlenmiştir. Gerilim uygulanan betonlarda ise hiperakışkanlaştırıcı oranının artması ile gerilim uygulanmayan betonlara göre 1 günlük basınç dayanımı oldukça yüksek çıkmıştır (Şekil 5). Hiperakışkanlaştırıcı oranları % 0.5, 1 ve 1.5 olan betonların 1 günlük basınç dayanımları şahitlerine göre sırasıyla % 30.90, 24.87 ve 61.49 artmıştır. Buradan betonlara hem hiperakışkanlaştırıcı konulması hem de AC gerilim uygulaması ile 1 günlük basınç dayanımının artırılabilceği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 5. Hiperakışkanlaştırıcı oranının ve AC gerilimin 1 günlük basınç dayanımına etkisi (The impact of hyper plasticizer ratio and AC current on 1 day compressive strenght)

3.5 S/ç Oranının 28 Günlük Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi (The impact of water/cement ratio on 28 day compressive strenght)

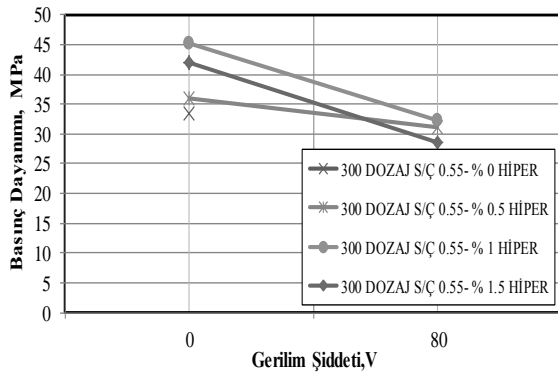
Genel olarak, su/çimento oranı azaldıkça betonun dayanımı artmaktadır. Ancak, su/çimento oranı çok düşük olduğunda (0.50' nin altında) betonu sıkıştırabilmek zorlaştığından (işlenebilirlik azaldığından) beton gözenekliliği artabilir ve basınç dayanımında düşüşler gözlemlenir. S/ç oranının ve gerilim şiddetinin 28 günlük basınç dayanımına etkisini araştırmak için Şekil 6 hazırlanmıştır. Gerilim uygulanmayan s/ç oranı 0.55 ve 0.65 olan betonların 28 günlük basınç dayanımları s/ç oranı 0.45 ve 0.70 olan betonların 28 günlük basınç dayanımlarından oldukça yüksek çıkmıştır (Şekil 6). Betonlar üzerine 80 V AC gerilim uygulandığında s/ç oranları 0.55, 0.65 ve 0.70 olan betonların basınç dayanımları sırası ile % 6.08, 30.86 ve 35.15 oranında azalmıştır. Gerilim uygulanan betonlarda s/ç oranı artması ile basınç dayanım kaybının artması beton iç sıcaklığı ile açıklanabilir. S/ç oranları 0.45, 0.55, 0.65 ve 0.70 olan betonların beton en yüksek iç sıcaklıkları sırasıyla 61.8, 61.8, 78 ve 86.9 °C ölçülmüştür. Betonlarda iç sıcaklık artması ile porozite oranlarında artış meydana gelmektedir. Örnek olarak s/ç oranı 0.55 olan gerilim uygulanmayan betonların poroziteleri 5.39 olarak ölçülmüşken, aynı numunelere 80 V AC gerilim uygulanması sonucu porozite 6.27 olarak ölçülmüştür. Beton iç sıcaklıklarının aşırı yükselmesi betonlarda 28 günlük basınç dayanımı kaybına neden olmaktadır. Betonlarda 100 °C' ye kadar iç sıcaklık artışı ile hidrasyon reaksiyonları hızlansa da basınç dayanımı azalması yaşanmaması için optimum iç sıcaklığın 45-50 °C olduğu sonucuna ulaşılmıştır [19]. Betonlarda s/ç oranı artması ile 28 günlük basınç dayanımları şahit numunelere göre en düşük azalan beton; s/ç oranı 0.55 olan karışımda görülmüştür. S/ç oranı 0.45 olan betonun 28 günlük basınç dayanımının diğer s/ç oranlarına sahip betonların 28 günlük basınç dayanımından daha düşük çıkması ise s/ç oranı 0.45 olan betonun işlenebilirliğinin en düşük olmasından kaynaklanmaktadır. S/ç oranları 0.45, 0.55, 0.65 ve 0.70 olan betonların çökme değerleri sırasıyla 12, 14, 15 ve 16 cm olarak ölçülmüştür.



Şekil 6. S/ç oranının ve AC gerilimin 28 günlük basınç dayanımına etkisi (The impact of hyper water/cement ratio and AC current on 28 day compressive strenght)

3.6 Beton İçine Konulan Farklı Oranlardaki Hiperakışkanlaştırıcının 28 Günlük Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi (The impact of hyper plasticizer ratio on 28 day compressive strength)

S/ç oranları 0.55 olan 300 dozajlı; şahit numunelerde genel olarak beton içerisine % 1 oranına kadar hiperakışkanlaştırıcı konulması ile 28 günlük basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir. Gerilim uygulanmayan % 1.5 oranında hiperakışkanlaştırıcı konulan betonun 28 günlük basınç dayanımı % 0 ve % 0.5 oranında hiperakışkanlaştırıcı konulan betonların 28 günlük basınç dayanımından yüksek olsa da; % 1 oranında hiperakışkanlaştırıcı içeren betonun 28 günlük basınç dayanımından düşük olduğu gözlenmiştir (Şekil 7). Bu durum beton içerisine % 1' den fazla hiperakışkanlaştırıcı konulması sonucu; betonda kumaya neden olması sebebiyle açıklanabilir. Farklı hiperakışkanlaştırıcı oranlarına sahip betonlara 80 V AC gerilim uygulaması sonucu genel olarak 28 günlük basınç dayanımlarında düşüşler meydana gelmiştir. Ancak; % 0.5 hiperakışkanlaştırıcı konulan betondaki 28 günlük basınç dayanımındaki düşüş en az olmuştur. Hiperakışkanlaştırıcı oranları % 0.5, 1 ve 1.5 olan betonlara 80 V gerilim uygulanması sonucu betonların basınç dayanım kayıpları sırasıyla % 13.64, 28.56 ve 32.00 olmuştur. Betona hiperakışkanlaştırıcı konulması ve AC gerilim uygulanması neticesinde basınç dayanımında düşüşlerin gözlenmesi hiperakışkanlaştırıcı konulan betonlarda beton iç sıcaklığın 60 °C' nin üzerine çıkması ile açıklanabilir.



Şekil 7. Hiperakışkanlaştırıcı oranının ve AC geriliminin 28 günlük basınç dayanımına etkisi (The impact of hyper plasticizer ratio and AC current on 28 day compressive strength)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu araştırmanın sonuçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- S/ç oranının priz sona erme süresinde büyük etkiye sahip olmadığı, s/ç oranının artması sonucu en yüksek beton iç sıcaklıklarında artış meydana getirdiği görülmüştür.

- Hiperakışkanlaştırıcı oranının priz sona erme süresi üzerinde çok etkili olmadığı, karışım içindeki hiperakışkanlaştırıcı oranının artması ile en yüksek beton iç sıcaklıklarında artış meydana getirdiği sonucuna ulaşılmıştır.
- Betonlara az miktarda (% 0.5) hiperakışkanlaştırıcı konulması ve 80 V AC gerilim uygulaması ile ciddi basınç dayanım kaybı yaşanmadan priz süresi kısaltılabilir.
- 300 dozajlı katkısız (% 0 hiperakışkanlaştırıcı konulan) betonlarda basınç dayanımı açısından en uygun s/ç oranı 0.55 ile 0.65 arasında olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum s/ç oranı 0.55' ten küçük betonlarda çok düşük çökme değerlerine sahip olmasıyla, 0.65' ten büyük s/ç oranlarında ise boşluk oranının artması nedenlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Tüm s/ç oranlarında betonlar üzerine 80 V AC gerilim uygulaması sonucu 1 günlük basınç dayanımında artış meydana gelmiştir. Betonların 28 günlük basınç dayanımlarında ise düşüşler meydana gelmiştir. Bu durum hidrasyonun ilk aşamalarında beton iç sıcaklıklarında artış meydana gelmesi sonucu kimyasal reaksiyonların hızlanması ve betonların çabuk priz alması, ilerleyen yaşlarda ise özellikle hidrasyonun ilk aşamalarında yüksek iç sıcaklık elde edilen betonlarda boşluk oranının artması sebebinden kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak betonun priz süresininin kılmasında belirli miktarda hiper akışkanlaştırıcı konulmasıyla geliştirilebilir. Az miktarda hiperakışkanlaştırıcı (% 0.5 vb.) konulmuş betonların hidrasyonu elektrik akımı iletilmesi sonucu hızlandırdığı düşünülmektedir. Çalışmanın farklı gerilim şiddeti uygulanması ve farklı içerikli karışımlar üzerinde araştırmalar yapılmasıyla daha kapsamlı sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Pavlenko S.I., "Heat treatment of fine- grained cementless concrete based on high-calcium fly ash and slag from thermal power plants", *Materials and Structures*, 153: 657-674, (1994).
- [2] Tokyay M., "Strength prediction of fly ash concretes by accelerated testing", *Cement Concrete Research*, 29: 1737-1741, (1999).
- [3] Wei X., Li Z., "Early hydration process of portland cement paste by electrical measurement", *J Mater Civ Eng*, 18: (1) 99-105, (2006).
- [4] McCarter W.J., Chrisp T.M., Starrs G., Blewett J., "Characterization and monitoring of cement-based systems using intrinsic electrical property measurements". *Cement and Concrete Research*, 33: 197-206, (2003).
- [5] Koleva D.A., Copuroglu O., Vanbreugel K., Ye G., Wit J.H.W., "Electrical resistivity and microstructural

- properties of concrete materials in conditions of current flow". *Cement and Concrete Composites*, 30: 731-744, 14, (2007).
- [6] Ghoddousi P., Saadabadi L.A., "Study on hydration products by electrical resistivity for self- compacting concrete with silica fume and metakaolin", *Construction and Building Materials*, 154: 219-228, (2017).
- [7] Schwarz N., Dubois M., Neithalath N., "Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes", *Cement and Concrete Composites*, 29: 656-666, (2007).
- [8] Uygunoğlu T., Hocaoğlu I., Topçu I.B., "Electrical Curing Application on Cement based Mortar with Different Stress Intensity", *ISBS 2017: Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017)*, 462-468, (2017).
- [9] Liao Y., Wei X., Li G., "Early hydration of sulfoaluminate cement through electrical resistivity measurement and microstructure investigations", *Construction and Building Materials*, 25: 1572-1579, (2011).
- [10] Yim H.J., Kim J.H., Shah S.P., "Ultrasonic monitoring of the setting of cement-based materials: Frequency dependence", *Construction and Building Research*, 65: 518-525, (2014).
- [11] Koleva D.A., Copuroglu O., Breugel K.V., Ye G., Wit J.H.W. de., "Electrical resistivity and microstructural properties of concrete materials in conditions of current flow", *Cem Concr Comp*, 30: 731-744, (2008).
- [12] Topçu İ.B., Uygunoğlu T., Hocaoğlu İ., "Electrical conductivity of setting cement paste with different mineral admixtures", *Construction and Building Materials*, 28: 414-420, (2012).
- [13] Topçu İ.B., Uygunoğlu T., Hocaoğlu İ., "Electrical resistivity of fly ash blended cement paste at hardening state", *Materials Science*, 22: 458-462, (2016).
- [14] Rajabipour F., Weiss J., "Electrical conductivity of drying cement paste", *Mater Struc*, 40: 1143-1160, (2007).
- [15] Uygunoğlu T., Hocaoğlu I., "Effect of electrical curing application on setting time of concrete with different stress intensity", *Construction and Building Materials*, 162: 298-305, (2018).
- [16] Topçu İ. B., Uygunoğlu T. ve Hocaoğlu İ., "Yüksek fırın curuf katkılı çimento pastalarının elektriksel özdirençlerinin araştırılması", *Politeknik Dergisi*, 21(2): 257-264, (2018).
- [17] Heikal M., Morsy M.S., Aiad I., "Effect of treatment temperature on the early hydration characteristics of superplasticized silica fume blended cement pastes", *Cem Concr Res*, 35: 680- 687, (2005).
- [18] Luo Y., Gan Y., Xu J., Yan Y., Shi Y., "Effect of electric field intensity and frequency of AC electric field on the small-scale ethanol diffusion flame behaviors", *Appl. Therm. Eng.*, 115: 1330–1336, (2017).
- [19] ASTM International, ASTM C1074-14, "Estimating Concrete Strength by the Maturity Method", West Conshohocken, PA, (2011).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Geleneksel yöntemle açılan karayolu tünellerinde çalışanların gürültü maruziyetlerinin değerlendirilmesi

Assessment of noise exposure among workers in highway tunnels constructed by conventional method

Yazar(lar) (Author(s)): Deniz AKBAY¹, Raşit ALTINDAĞ², Nazmi ŞENGÜN³

*ORCID*¹: 0000-0002-7794-5278

*ORCID*²: 0000-0002-5397-7312

*ORCID*³: 0000-0003-0407-7198

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Akbay D., Altındağ R. ve Şengün N., “Geleneksel yöntemle açılan karayolu tünellerinde çalışanların gürültü maruziyetlerinin değerlendirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1053-1060, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.495339

Geleneksel Yöntemle Açılan Karayolu Tünellerinde Çalışanların Gürültü Maruziyetlerinin Değerlendirilmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Deniz AKBAY*, Raşit ALTINDAĞ, Nazmi ŞENGÜN

Mühendislik Fakültesi, Maden Müh. Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 11.12.2018 ; Kabul/Accepted : 07.02.2019)

ÖZ

Gürültü; istenmeyen, hoş gitmeyen, rahatsız edici ses olarak tanımlanmaktadır. İnsanların işitme fonksiyonlarını olumsuz etkilemenin yanında diğer vücut işlevlerinin de olumsuz etkilenmesine neden olmakta, sözel iletişimi ve tehlike uyarılarının algılanmasını engellemektedir. Bu nedenle çalışma ortamındaki gürültü düzeyinin belirlenmesi hem iş sağlığı ve güvenliği hem de çalışanların verimi açısından önemlidir.

Bu çalışma kapsamında, Antalya Kemer’de açılan Altan Ayağ Tüneli inşaatındaki farklı operasyonel faaliyetlerde oluşan gürültü düzeylerinin ölçülerek mevzuatta izin verilen sınır değerler içinde olup olmadıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için öncelikle bu tünel inşaatındaki gürültü kaynakları belirlenmiş ve tünel güzergâhı boyunca gürültü düzeyi ölçümleri alınmıştır. Gürültü düzeyi ölçümlerinden elde edilen veriler tünel içinde çalışmanın yapıldığı farklı kaya birimleri için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Yapılan gürültü ölçümleri sonucunda en yüksek maruziyet değerinin 110,9 dB(A) değeri ile püskürtme beton uygulamasında, en düşük maruziyet değerinin ise 79,4 dB(A) ile hafriyat işleminde ve 79,4 dB(A) ile kaya saplaması enjeksiyon işleminde olduğu belirlenmiştir. Kazı, püskürtme beton ve delik delme işlemlerinde çalışanların maruziyet sınır değerinin üzerinde gürültüye maruz kaldığı tespit edilmiştir. Hafriyat, çelik hasır montajı ve kaya saplaması enjeksiyon işleminde çalışanların minimum maruziyet eylem değeri olan 80 dB(A) değerinin altında, iksa montajında çalışanların ise bu değerin üzerinde gürültüye maruz kaldığı belirlenmiştir. Maruziyet sınır değerinin aşıldığı iş kalemlerinde gürültüye karşı önlem olarak kulak koruyucuların ışıklı ikaz sistemleri ile birlikte kullanılması önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İş sağlığı ve güvenliği, gürültü ölçümü, tünel, madencilik.

Assessment of Noise Exposure Among Workers in Highway Tunnels Constructed by Conventional Method

ABSTRACT

Noise is defined as unwanted, unpleasant, disturbing sound. Besides affecting the hearing function and the other body functions adversely, it prevents verbal communication and the perception of hazardous warnings. Therefore, it is important to determine the noise levels at work both for the occupational health and safety and performance of the employees.

In the scope of this study, it was aimed to find out if the noise levels, measured during different operational activities of the construction of Altan Ayağ Tunnel located in Kemer, Antalya, were within the permitted limits in the regulation. Thus, noise sources were determined and noise levels were measured along the tunnel route. The data obtained from noise level measurements were evaluated separately for different types of rock units in which tunnelling was performed. As a result of the noise measurements, the maximum exposure value was identified as 110.9 dB(A) in the shotcrete application, the lowest exposure value was identified as 79.4 dB(A) in the excavation process and 79.4 dB(A) in the rock bolt injection process. It was determined that the workers in the excavation, shotcrete and drilling operations were exposed to noise above the exposure limit value. Workers in the earth moving, mesh reinforcement and rock bolt injection processes were exposed to noise below 80 dB(A), which is the minimum exposure action value, while those working in the steel timbering application were exposed to noise above this value. It was suggested that, warning lamps should be used in company with earmuffs as a precaution against noise in operational activities where exposure limit value is exceeded.

Keywords: Occupational health and safety, noise measurement, tunnel, mining.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya’da Uluslararası Çalışma Örgütü’nün (ILO) raporuna göre dünyada her yıl 2,78 milyondan fazla insan iş kazaları veya iş ile ilgili hastalıkların sonucu olarak

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : denizakbay@sdu.edu.tr

ölmektedir. Buna ek olarak, her yıl ölümcül olmayan işle ilgili yaralanmalarda ve hastalıklarda 374 milyon vaka kaydedilmektedir ve bunların çoğu uzun süre iş göremezlikle sonuçlanmaktadır [1]. Bu tablonun maliyeti yüksektir ve kötü iş güvenliği ve sağlık uygulamalarının ekonomik yükünün, her yıl küresel Gayri Safi Yurtiçi

Hasıla'nın yüzde 4'ünü oluşturduğu tahmin edilmektedir [1].

İş Güvenliği ve Sağlığı İdaresi (OSHA) tarafından da; Avrupa ülkelerinde iş kazaları ve meslek hastalıkları sonucu yılda 5500 kişinin hayatını kaybettiği, 75000 kişinin iş göremez duruma geldiği ve 20 milyar Euro maddi kaybın meydana geldiği rapor edilmektedir [2]. Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) istatistiklerine göre 2016 yılında Türkiye'de 241115 iş kazası, 5597 meslek hastalığı vakası (bunların 6'sı işitme kaynaklı meslek hastalığı) meydana gelmiş, iş kazalarının 1483'ü, meslek hastalıklarının 3'ü karayolu tünel inşaatlarında meydana gelmiştir [3]. Bu rakamların yanı sıra SGK istatistiklerine yansımayan iş kazaları ve meslek hastalıkları sonucu kayıplar da ayrıca dikkate alındığında, iş sağlığı ve güvenliğinin sosyal ve ekonomik açıdan önemi açıkça görülmektedir.

Çizelge 1. Gürültünün insan sağlığı üzerine etkileri (The effects of noise on human health) [8]

| | |
|---------------------|--|
| Fiziksel Etkiler | İşitme duyusunda meydana getirdiği olumsuz etkilerdir. Bu etkiler geçici veya kalıcı işitme kayıplarıdır. |
| Fizyolojik Etkiler | Kan basıncının artması, kas gerilmeleri, stres, kalp atışlarının değişmesi, gözbebeği büyümesi, uykusuzluk, solunumda hızlanma, vücut aktivitesinde değişiklikler, dolaşım bozuklukları, ani refleksler. |
| Psikolojik Etkiler | Davranış bozuklukları, sinir sisteminde bozukluklar, korku, rahatsızlık, yorgunluk, zihinsel işlevlerde yavaşlama. |
| Performans Etkileri | İş verimini azaltması ve seslerin anlaşılabilirliğini bozması gibi etkilerdir. Gürültünün iş verimliliğini ve üretkenliğini olumsuz yönde etkilediği araştırmalarla saptanmıştır. İşyerlerindeki gürültü düzeyi ile verimlilik arasında anlamlı bir ilişki vardır. |

Gürültü, tüm sesler gibi normal hava basıncının altında ve üstünde basınç değişiklikleri oluşturan bir titreşim aracılığıyla oluşmaktadır. Hava basıncında oluşan değişiklikler, işitme organlarına dalgalar halinde ulaşmakta ve bunun sonucu ses olarak duyulmaktadır [4].

Duyuma yeteneği kişiden kişiye göre büyük değişimler göstermekle birlikte, sağlıklı ve genç bir insan kulağı 20 Hz ile 20 kHz arasındaki frekanslara sahip sesleri duyabilmektedir.

Gürültünün şiddeti, ses dalgasının oluşturduğu basıncın boyutuna veya dalganın genliğine bağlıdır. Bu genlik basınç dalgalanması olarak ölçülmekte olup sağlıklı bir insan kulağının duyabileceği en düşük ses 20 μ Pa (0 dB) olarak verilmiştir. İnsan kulağı bundan on milyon kat daha yüksek olan 200 Pa (140 dB) ses basıncına dayanabilmektedir [5]. Günlük hayatta karşılaşılan gürültü seviyeleri 60-140 dB(A) arasında değişmekte, 90 dB(A)'ın üstündeki gürültü değerleri insan sağlığı açısından zararlı kabul edilmektedir [6].

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı (ÇSGB), 28.07.2013 tarih ve 28721 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan "Çalışanların Gürültü İle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik" ile çalışanların gürültüye maruz kalmaları sonucu oluşabilecek sağlık ve güvenlik risklerinden, özellikle işitme ile ilgili risklerden korunmaları için maruziyet eylem değerleri ve maruziyet sınır değerlerini belirtmektedir. Bunlar:

a) En düşük maruziyet eylem değerleri: (LEX, 8saat) = 80 dB(A) veya (Ptepe) = 112 Pa [135 dB(C) re. 20

μ Pa] (20 μ Pa referans alındığında 135 dB(C) olarak hesaplanan değer),

b) En yüksek maruziyet eylem değerleri: (LEX, 8saat) = 85 dB(A) veya (Ptepe) = 140 Pa [137 dB(C) re. 20 μ Pa],

c) Maruziyet sınır değerleri: (LEX, 8saat) = 87 dB(A) veya (Ptepe) = 200 Pa [140 dB(C) re. 20 μ Pa],

olarak yönetmelikte tespit edilmiştir [7].

Gürültü, insan sağlığını fiziksel, fizyolojik, psikolojik ve performans yönünden olumsuz olarak tehdit etmektedir. Bu tehditler kısaca Çizelge 1.'deki gibi dört başlık altında toplanabilir. Görüldüğü gibi gürültü kirliliği insanların işitme algılamasını olumsuz yönde etkilemekte, fizyolojik ve psikolojik dengelerini bozarak iş verimliliğini düşürmektedir.

Gürültü kaynaklı işitme kaybı; dünyada ve ülkemizde sık görülen en önemli meslek hastalıklarından birisidir. İsveç'te toplam çalışanların %9'luk bölümünün zararlı düzeydeki gürültüye sürekli olarak maruz kaldığı belirtilmektedir. Gürültü kaynaklı işitme kaybı, Kanada ve ABD'de en sık görülen on meslek hastalığı arasında yer almaktadır [9]. ABD'de yetişkinler arasında en yaygın görülen üç fiziksel rahatsızlıktan birisi gürültü kaynaklı işitme kaybıdır ve çalışan nüfusun %11'inde işitme güçlüğü, bunun da yaklaşık %24'ü meslek hastalığı kaynaklıdır [10].

Literatür incelendiğinde farklı endüstri kollarında iş sağlığı ve güvenliği konusunda yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Çalışanların maruz kaldığı gürültünün değerlendirildiği de çok sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Araştırmacılar en çok yeraltı ve yerüstü kömür ocaklarında gürültü düzeyi ölçümleri yapmışlar, kullanılan makine ve ekipmanların neden olduğu gürültü düzeylerini değerlendirmişler ve çalışanlar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir [4; 8; 11-22]. Doğal taş işleme fabrikalarında yapılan çalışmalarda ise gürültü düzeyleri ölçümlerinin yanında çalışanların gürültüden etkilenme derecelerinin tespiti için maruziyet süreleri de değerlendirilmiş ve odyolojik etkileri incelenmiştir [23-26]. Taş ocaklarında yapılan çalışmalarda ise genellikle gürültü haritalarının çizildiği ve bu tesislerde çalışan işçilerin çalışma alanlarındaki gürültü seviyelerine bağlı işitme kayıplarının incelendiği, çalışanların gürültü maruziyetini azaltmak için önerilerde bulunduğu

görülmektedir [27-29]. Ayrıca literatürde farklı endüstri dallarında, farklı madenlerde ve tünellerde kullanılan iş makineleri için ve farklı gürültü düzeyi değerlendirme yöntemlerinin kullanıldığı çok sayıda çalışma bulunmaktadır [30-39]. Yapılan tüm bu çalışmalarda ortak olarak en yüksek ve düşük gürültü maruziyet değerleri belirlenmiş ve çalışanlar üzerindeki etkilerini azaltıcı önerilerde bulunulmuştur.

Gürültü ile ilgili çalışmalarda büyük bir bölümü gürültü ölçümleri oluşturmaktadır. Gürültü ölçümlerinde amaç, gürültü kaynağını bulmak veya belli bir noktadaki gürültü düzeyini saptamaktan, gürültünün frekans dağılımını bulmaya ya da darbe gürültüsünü tespit etmeye kadar çok çeşitli olabilir. En çok kullanılan ölçüm istenilen bir yerdeki gürültü düzeyinin saptanmasıdır. Bu tür ölçümler genellikle çevre gürültüsünün standartlara uygunluğunu ya da bir işyerindeki gürültü düzeyinin istenen sınır değerler içinde olup olmadığını kontrol etmek için yapılmaktadır [40-45]. Bu çalışma, Antalya-Kemer arasında açılan Altan Ayağ tüneli inşaatındaki operasyonel faaliyetler sırasında oluşan gürültü düzeylerinin istenen sınır değerler içinde olup olmadığını saptamak için yapılmıştır.

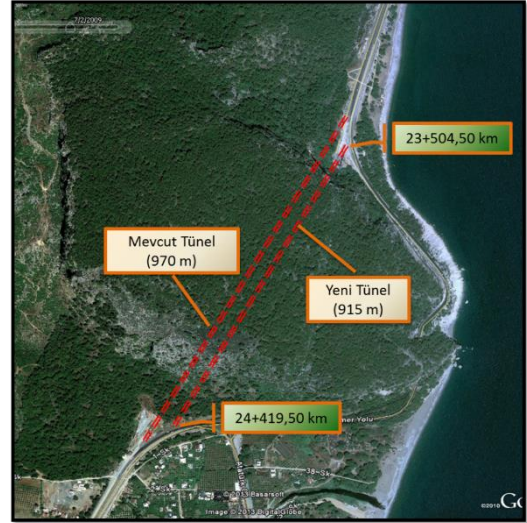
Gürültü iş kazalarının meydana gelmesindeki etkin parametrelerden biridir. Yapılan bir araştırmaya göre 90 dB(A) üzerindeki gürültünün kaza riskini %40 oranında artırdığı vurgulanmıştır [30]. Gürültünün; tepki zamanında, ürün verimliliğinde ve hata oranında artışa neden olduğu bilinmektedir. Aynı zamanda gürültünün kişilerde vücut direncinin azalmasına ve bitkinliğin kronikleşmesine yol açtığı için hastalıklara yakalanma olasılığını da artırmaktadır [46]. Koordineli çalışmayı gerektiren işlerde iletişimi zorlaştırmakta ve aksaklıklara neden olmakta, sesli işaret ve uyarıcıların duyulmasını engellemektedir. Ayrıca gürültüye karşı önlem olarak kullanılan kulak koruyucular duyulması gereken uyarı seslerinin duyulmasına engel olarak kaza riskini artırmaktadır.

Tünel inşaatlarında da ağır iş makinelerinin kullanılması nedeniyle çalışmalar sırasında çalışanlar yüksek gürültüye maruz kalmaktadır. Gürültünün sonucu olarak geçici ve kalıcı duyma kayıpları oluşmaktadır. İşitme kaybı ilk bakışta gürültüye bağlı ortaya çıkan bir meslek hastalığı gibi görünmesine rağmen, insan bedeni üzerindeki etkileri düşünüldüğünde iş kazalarının nedenleri içerisinde de önemli bir yer tutmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışma kapsamında gürültü ölçümlerinin yapıldığı tünel, Karayolları Genel Müdürlüğü 13. Bölge Müdürlüğü'nün sorumluluk alanında bulunmaktadır. Antalya-Kemer-Tekirova güzergâhında mevcut tünele paralel, Km 23+504.50 – 24+419.50 arasında yer almaktadır (Şekil 1). Tünel "NATM, Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu" ile açılmıştır. Geçilen kaya birimlerinin (kireçtaşı, konglomera, serpantin) yapısal

özelliklerine göre hidrolik kırıcı ile veya delme patlatma ile ilerleme yapılmakta ve uygulanan tahkimat sistemi ve sıklığı da buna göre değişmektedir.



Şekil 1. Yeni tünel (çalışma alanı) Google Earth yerleşimi (Google Earth layout of new tunnel (study area)) [36]

Ölçümler Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği"nde yer alan tüm gürültü ölçümleri için uygun olan yüksek hassasiyete sahip CEM DT-8852 model gürültü ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Çizelge 2'de gürültü ölçümlerinde kullanılan cihazın teknik özellikleri verilmiştir.



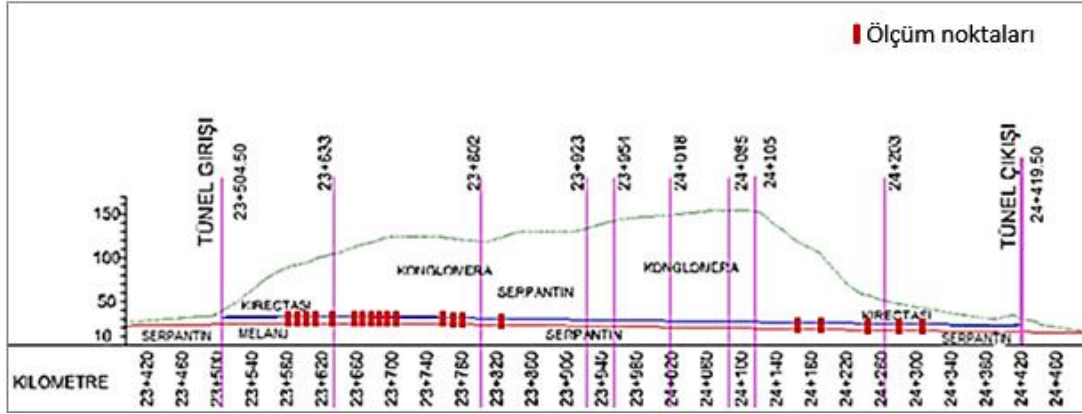
Şekil 2. CEM DT-8852 model gürültü ölçüm cihazı (CEM DT-8852 sound level meter)

Çizelge 2. Gürültü ölçüm cihazına ait bazı teknik özellikler (Some technical specifications of sound level meter)

| | |
|------------------------|-----------------------------|
| Frekans Aralığı | 31,5 Hz – 8 kHz |
| Doğruluk | ± 1,4 dB |
| Otomatik ölçüm aralığı | 30 – 130 dB |
| Doğruluk | ± 1,4 dB |
| Çözünürlük | 0,1 dB |
| Dinamik aralık | 50 dB |
| Örnekleme | Hızlı (125 ms), yavaş (1 s) |

Tünelde gürültü düzeyi ölçümleri, çalışan iş makinasına 2 m mesafede, TS EN ISO 9612 (47)'de belirtildiği şekilde, 5 s aralıklarla 2 dak süreyle dB(A) biriminde yapılmıştır. Farklı iş kalemlerinde her vardiyada tek sefer ölçüm alınmış ve her ölçümde 60 adet gürültü ölçümü kaydedilmiştir. Tünel içinde oluşan gürültüler kararlı gürültülere örnek teşkil etmektedir. Literatürde kararlı gürültülerde ölçüm yapılırken genellikle 3 dakikalık ölçümler yapıldığı görülmüş fakat tünel içinde iş

güvenliği açısından risk oluşturmamak ve yoğun iş akışını aksatmamak için bu çalışma özelinde ölçüm yapılan iş kalemlerinde farklı vardiyalar için 2 dakikalık ölçümler alınabilmektedir. Tünel içinde 20 noktadan toplamda 6114 adet gürültü ölçümü kaydedilmiştir (Şekil 3). Tünel inşaatında gürültü ölçümleri yapılan iş kalemleri ve gürültü kaynakları Çizelge 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Tünel güzergâhındaki jeolojik birimler ve ölçüm noktaları (Geological units and measurement points in the tunnel route)

Çizelge 3. Tünel inşaatında gürültü ölçümleri yapılan iş kalemleri ve gürültü kaynakları (Noise measurements and noise sources in tunnel construction)

| İş kalemi adı | Yapılan iş | Gürültü kaynağı |
|---------------------------------------|---|--|
| Kazı işlemi | Aynada hidrolik kırıcı ile kayacın gevşetilmesi ve koparılması işlemidir | Hidrolik kırıcı |
| Hafriyat işlemi | Aynada hidrolik kırıcı ile kazılan veya patlatma sonrası akan malzemenin lastik tekerlekli yükleyici ile kamyonla yüklenmesi ve tünel dışına nakliye edilmesi işlemidir | Lastik tekerlekli yükleyici, kamyon |
| İksa montajı | İksa imalatı sırasında parçalı olarak bulunan iksalar civata ve somun kullanılarak birbirlerine ek yerlerinden monte edilerek yerleştirilir. Aşamalı kazılarda, her aşamada kazı cidarının geometrisine uygun olarak birbirine monte edilirler. İşlem lastik tekerlekli yükleyici ve ekskavatör yardımıyla yapılmaktadır | Lastik tekerlekli yükleyici, ekskavatör |
| Çelik hasır montajı | Püskürtme beton donatısı olarak kullanılır. Tünel cidarına 30-45 cm bindirme boyları ile lastik tekerlekli yükleyici yardımı ile uygulanır | Lastik tekerlekli yükleyici |
| Püskürtme beton uygulamasındaki | Püskürtme beton aracının uygulamanın yapılacağı yere getirildikten sonra, priz hızlandırıcı katkı ilave edilmiş karışımın tünel yan cidarına ve tavanına yüksek hızla püskürtülme işlemidir | Püskürtme beton makinası |
| Kaya saplaması delgisi | Tünel yan cidarı ve tavanına montajı yapılacak kaya saplamaları için delik delme işlemidir. Delikler delik delme makinası ile delinir | Delik delme makinası |
| Kaya saplaması enjeksiyon işlemindeki | Zeminin yapısal durumuna ve kendi kendini tutabilme özelliklerine göre, belirlenen aralıklarda delici makineyle açılan deliklere çimento ve su karışımından oluşan enjeksiyonun uygulanması işlemidir. Enjeksiyonun ardından nervürlü çelikten imal edilmiş kaya saplamaları deliklere itilerek yerleştirilir. Enjeksiyon delik içerisinde kuruduktan, sertleştikten sonra ucundaki somun ve plaka sıkılaştırılır | Lastik tekerlekli yükleyici, portatif beton mikseri, pompa |
| Ayna delgisi | Hidrolik kırıcı ile kazı işlemi gerçekleştirilemeyecek durumda olan zemini gevşetmek için patlatma işlemi yapılır. Patlatma işlemi için kazı cidarına delici makine ile belirli geometride delikler delinmesi işlemidir | Delik delme makinası |

Yukarıda sayılan iş kalemlerinde gürültü ölçümleri yapılmış ve her bir iş kalemi kendi içinde her kaya birimi (kireçtaşı, konglomera, serpantin) için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Gürültü ölçüm sonuçları, 20-20 kHz arasındaki tam ses aralığını kapsadığı ve düşük frekans düzeylerinde insan kulağının tepkisini en iyi yansıttığı için genel amaçlı gürültü ölçümlerinde yaygın biçimde kullanılan A ağırlıklı filtre üzerinden verilmiştir. Bu makineler için yapılan ölçüm sonuçları eşdeğer gürültü seviyelerine çevrilmiştir [48]. Tüm iş kalemleri için ölçülen gürültü değerlerini birlikte değerlendirebilmek için, çalışanların işlerini bir tam vardiya boyunca sürdürdükleri kabul edildiğinde 8 saatlik eşdeğer gürültü düzeyleri (Leq,8h) hesaplanmıştır.

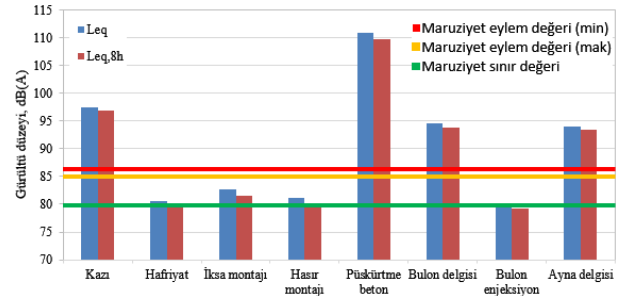
3. ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH FINDINGS)

İş kalemlerinde gürültü ölçümlerine başlamadan önce tünel içerisinde herhangi bir çalışma yok iken, her kaya biriminde gürültü ölçümleri yapılmış ve 66,5-74,5 dB(A) arasında gürültü değerleri kaydedilmiştir. Yapılan

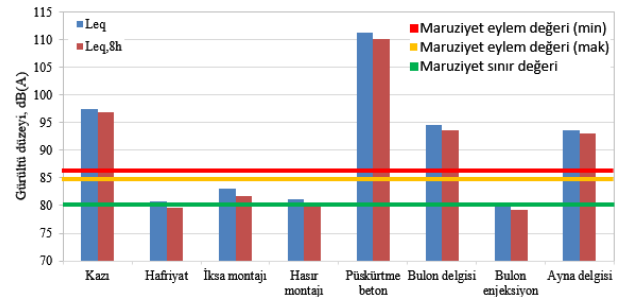
Çizelge 4. İş kalemleri için gürültü seviyeleri, dB(A) (Noise levels for operational activities, dB(A))

| İş kalemi | min | mak | Leq | Leq,8h | Kaya birimi |
|--------------------------------|------|-------|-------|--------|-------------|
| Kazı işlemi | 80,0 | 99,4 | 97,4 | 96,8 | Kireçtaşı |
| | 80,3 | 99,4 | 97,4 | 96,8 | Konglomera |
| | 80,3 | 99,4 | 97,6 | 97,0 | Serpantin |
| Hafriyat işlemi | 70,0 | 82,0 | 80,5 | 79,3 | Kireçtaşı |
| | 70,0 | 81,9 | 80,8 | 79,6 | Konglomera |
| | 70,0 | 81,7 | 80,4 | 79,2 | Serpantin |
| İksa montajı | 70,0 | 99,4 | 82,7 | 81,5 | Kireçtaşı |
| | 70,2 | 98,5 | 83,0 | 81,8 | Konglomera |
| | 70,3 | 99,4 | 81,9 | 80,7 | Serpantin |
| Çelik hasır montajı | 71,3 | 82,9 | 81,2 | 80,0 | Kireçtaşı |
| | 71,3 | 82,5 | 81,1 | 79,9 | Konglomera |
| | 71,1 | 83,9 | 80,9 | 79,7 | Serpantin |
| Püskürtme beton uygulaması | 98,2 | 112,9 | 111,0 | 109,8 | Kireçtaşı |
| | 98,0 | 98,8 | 111,3 | 110,1 | Konglomera |
| | 98,0 | 114,9 | 112,2 | 111,0 | Serpantin |
| Kaya saplama delgisi | 90,0 | 96,0 | 94,7 | 93,8 | Kireçtaşı |
| | 90,2 | 95,7 | 94,5 | 93,6 | Konglomera |
| | 90,0 | 96,0 | 94,9 | 94,0 | Serpantin |
| Kaya saplama enjeksiyon işlemi | 70,4 | 81,4 | 80,1 | 79,2 | Kireçtaşı |
| | 70,9 | 81,4 | 80,2 | 79,3 | Konglomera |
| | 70,0 | 82,0 | 80,3 | 79,4 | Serpantin |
| Ayna delgisi | 89,0 | 95,6 | 94,1 | 93,5 | Kireçtaşı |
| | 89,2 | 96,0 | 93,6 | 93,0 | Konglomera |
| | 89,0 | 95,8 | 93,7 | 93,1 | Serpantin |

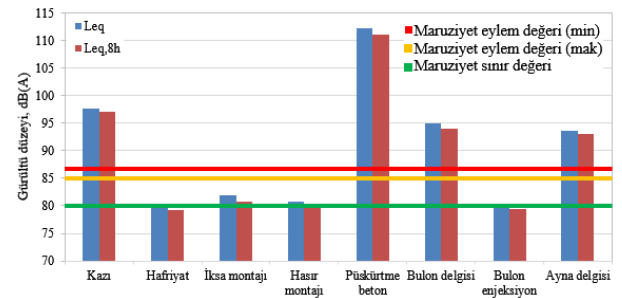
ölçümler sonucunda, her iş kalemi ve her kaya birimi için minimum, maksimum, eşdeğer gürültü düzeyleri ile 8 saatlik eşdeğer gürültü düzeyleri belirlenmiştir (Çizelge 4). Çizelge. 4 incelendiğinde en yüksek maruziyet değerinin püskürtme beton uygulamasında 109,8-111,0 dB(A) arasında, en düşük maruziyet değerinin de kaya saplama enjeksiyon işleminde 79,2-79,4 dB(A) arasında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, üç farklı kaya birimi için her bir iş kaleminde oluşan gürültü maruziyet değerleri Şekil. 4-6'da gösterilmiştir. Şekil. 4-6 incelendiğinde kazı, püskürtme beton, kaya saplama delgisi ve ayna delgisi işlemlerinde ölçülen gürültü düzeylerinin, maruziyet eylem sınır değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Hafriyat, iksa montajı ve çelik hasır montajı ile kaya saplama enjeksiyon işlemlerinde oluşan gürültü düzeylerinin ise minimum maruziyet eylem değeri olan 80 dB(A) civarında olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Operasyonel faaliyetler sırasında kireçtaşında oluşan gürültü maruziyet değerleri (Noise exposure values in limestone during operational activities)



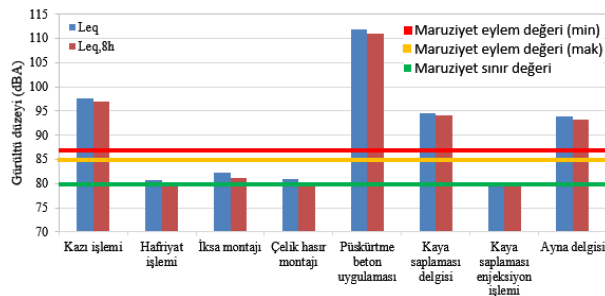
Şekil 5. Operasyonel faaliyetler sırasında konglomera oluşan gürültü maruziyet değerleri (Noise exposure values in conglomerate during operational activities)



Şekil 6. Operasyonel faaliyetler sırasında serpantinde oluşan gürültü maruziyet değerleri (Noise exposure values in serpentine during operational activities)

Tünel inşaatı sırasında 3 farklı kaya birimi geçilmiştir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde (Çizelge 5) farklı kaya birimlerinde yapılan gürültü düzeyi ölçümlerinde aynı iş kalemi için gürültü düzeylerinin birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle, ölçüm sonuçları değerlendirilirken, gürültü düzeylerinin geçilen kaya biriminin gürültü düzeyinde yarattığı farklılığın çalışan iş makinasının gürültü düzeyinin altında kaldığı belirlenmiştir. Bu yüzden tünel inşaatı operasyonel faaliyetlerinde oluşan gürültü düzeyleri, üç farklı kaya birimi için toplu halde tekrar değerlendirilmiştir (Çizelge 5).

Çizelge. 5 incelendiğinde en yüksek maruziyet değerinin 110,9 sB(A) değeri ile püskürtme beton uygulamasında olduğu, en düşük maruziyet değerinin ise 79,4 dB(A) ile hafriyat işleminde ve 79,4 dB(A) ile kaya saplama enjeksiyon işleminde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca Şekil. 7 incelendiğinde kazı, püskürtme beton ve delik delme işlemlerinde çalışanların maruziyet eylem sınır değerinin üzerinde gürültüye maruz kaldığı belirlenmiştir. Hafriyat, çelik hasır montajı ve kaya saplama enjeksiyon işleminde çalışanların minimum maruziyet eylem değerinin altında, iksa montajında çalışanların ise minimum maruziyet eylem değeri olan 80 dB(A) üzerinde gürültüye maruz kaldığı ölçülmüştür.



Şekil 7. Çalışanların gürültü maruziyet düzeyleri (Workers noise exposure levels)

Çizelge 5. İş kalemleri için gürültü seviyeleri (Noise levels for operational activities)

| İş kalemi | Ölçüm Sayısı | Leq | Leq,8h |
|-----------------------------------|--------------|-------|--------|
| Kazı işlemleri | 912 | 97,6 | 97,0 |
| Hafriyat işlemleri | 714 | 80,6 | 79,4 |
| İksa montajı | 816 | 82,3 | 81,1 |
| Çelik hasır montajı | 1104 | 81,0 | 79,8 |
| Püskürtme beton uygulaması | 1080 | 111,9 | 110,9 |
| Kaya saplama delgisi | 576 | 94,6 | 94,0 |
| Kaya Saplama enjeksiyon işlemleri | 648 | 80,3 | 79,4 |
| Ayna delgisi | 264 | 93,8 | 93,2 |

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, örnek bir tünel inşaatında, çalışanların maruz kaldığı gürültü düzeyleri her bir operasyonel faaliyetler sırasında ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu

sayede tünel inşaatlarında çalışanların maruz kaldığı gürültü kaynakları belirlenmesi ve iş güvenliği konusunda gürültü anlamında alınması gereken önlemlerin daha sağlıklı bir şekilde planlanabilmesi hedeflenmiştir. Gürültü maruziyetini azaltacak önlemler literatürde çokça incelendiği için bu çalışma kapsamında değinilmemiştir.

Bu çalışma kapsamında bir tünel açılırken yapılan operasyonel faaliyetler sırasında çalışanların maruz kaldığı gürültü düzeylerinin belirlenmesi için gürültü ölçümleri alınmıştır. Böylece, tünel inşaatlarında çalışanların maruz kaldığı gürültü kaynakları belirlenmesi ve gürültü düzeyleri konusunda alınması gereken önlemler ve eylem planlarının planlanması hedeflenmiştir.

Gürültü ölçümü yapılan iş kalemleri kazı, hafriyat, iksa montajı, çelik hasır montajı, püskürtme beton, kaya saplama delgisi, kaya saplama enjeksiyon işlemi ve ayna delgisi olarak belirlenmiştir. Tünel içinde oluşturulan 20 ölçüm istasyonundan toplamda 6114 gürültü ölçümü kaydedilmiştir. Buna göre;

- Kazı işlemi, püskürtme beton uygulaması ve delik delme işlemlerinde çalışanların gürültü ölçümleri sonucunda maruz kaldıkları gürültü düzeylerinin maruziyet sınır değerinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bu durumda bu iş kalemlerinde çalışanların maruz kaldıkları gürültü düzeyini azaltmak için kişisel kulak koruyucu kullanması önerilmektedir. Kullandıkları kişisel kulak koruyucunun teknik özelliğine göre etkisi de dikkate alınarak maruz kaldıkları gürültü düzeyi tekrar hesaplanıp yeniden değerlendirilmelidir.
- İksa montajı işinde çalışanların maruz kaldıkları gürültü düzeyi >80 dB(A) dikkate alındığı yerlerinde kişisel kulak koruyucu bulundurmaları önerilebilir. Hafriyat, çelik hasır montajı ve kaya saplama enjeksiyon işleminde çalışanların maruz kaldığı gürültü düzeyi göz önüne alındığında <80 dB(A) herhangi önlem ve eylem planı gerektirmediği görülmüştür.
- Tünel inşaatı sırasında 3 farklı kaya birimi geçilmiştir. Ölçüm sonuçları değerlendirilirken, gürültü düzeylerinin geçilen kaya biriminin gürültü düzeyinde yarattığı farklılığın çalışan iş makinasının gürültü düzeyinin altında kaldığı belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle çalışma kapsamında geçilen 3 farklı kaya biriminin ölçüm yapılan iş kalemlerinde kullanılan makinaların oluşturduğu gürültü düzeylerine etkisi olmamaktadır.
- Maruziyet sınır değerinin aşıldığı iş kalemlerinde gürültüye karşı önlem olarak kulak koruyucular kullanılmalıdır. Fakat aynı anda farklı iş kalemlerinin koordinasyonlu olarak çalıştığı, yoğun iş makinası trafiğinin hakim olduğu, ayrıca yeterli aydınlatmanın çoğu zaman sağlanmadığı tünel inşaatlarında kulak koruyucular kullanılması durumunda, kulak koruyucular duyulması gereken uyarı seslerinin duyulmasına engel olarak kaza riskini artıracığından, çalışma ortamına çalışma başlamadan otomatik olarak

devreye girecek ışıklı ikaz sistemlerinin de konulması daha uygun olacaktır. Bu sistemler; faaliyet veya durumu işaret eden renkli ve ışıklı levha ve/veya ışıklı sinyal, el-kol işareti yoluyla iş sağlığı ve güvenliği hakkında bilgi veren, tehlikelere karşı uyarıcı talimat veren işaretler olabilir.

- Ayrıca iş makinası operatörlerinin makina içinde daha yüksek gürültüye maruz kalacakları aşikârdır. Önlem olarak makine makinalardaki operatör kabinleri tamamen kapalı ve ses yalıtım özelliğine sahip olmalıdır.
- İnşaat işleri, işitme kaynaklı meslek hastalıklarının en yoğun olduğu sektörlerden birisidir. Bu çalışmada çalışanlarla yapılan görüşmelerden edinilen bilgiye göre, gürültü kaynaklı işitme kaybının bir meslek hastalığına dönüşebileceği konusunda çalışanlar yeterli kadar bilgili değildir, bilgili olanlar da alınması gereken önlemler ile ilgili olarak gereken tedbirleri almamaktadır.
- İşletmede gürültü ile ilgili ölçümlerin düzenli olarak yapıldığı gözlenmiştir. Tünel inşaatlarında gürültü ile ilgili periyodik ölçümler yapılmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır, çalışanlar düzenli olarak kişisel koruyucu donanımların doğru ve düzenli biçimde kullanılmasını konusunda bilgilendirilmelidir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi ÖYP Kurum Koordinasyon Birimi tarafından OYP05286-YL-12 No'lu Proje ile mali olarak desteklenmiştir. Yazarlar Süleyman Demirel Üniversitesi ÖYP Kurum Koordinasyon Birimi'ne ve EKOL KOZ Maden İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti.'ne teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] <https://www.ilo.org/global/topics/safety-and-health-at-work/lang-en/index.htm>, 21.11.2018.
- [2] <http://www.osha.eu.int>, 21.11.2018.
- [3] www.sgk.gov.tr, “SGK istatistik yıllıkları”, (2018).
- [4] Çınar, İ., “Madencilikte Gürültü Analizi, Modellenmesi ve Haritalanması”, *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, (2005).
- [5] Sezek, H., “İş Sağlığı ve Güvenliği Alanında Gürültü Ölçümleri, Kişisel Maruziyet Hesaplama, Kullanılacak Kulak Koruyucu Seçimi”, *İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 9(44): 10-13, (2009).
- [6] Ünver, B., “Madencilik faaliyetleri sırasında oluşan gürültünün işçi sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin incelenmesi”, *Uluslararası Madencilikte İşçi Sağlığı ve Çevre Konferansı*, Ankara, 83-98, (1995).
- [7] Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, “*Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik*”, Ankara, (2013).
- [8] Fişne, A., “Türkiye Taşkömürü Kurumu Ocaklarında Gürültü Koşullarının İncelenmesi, Etkilenme Düzeylerinin İstatistiksel Analizi ve Risk Değerlendirmesi”, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2008).
- [9] Çakır, A., “Ankara’da Mobilya İmalatı Yapan 7 Fabrikada Gürültü Düzeylerinin Saptanması ve Gürültüye Bağlı İşitme Kayıplarının İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2010).
- [10] Yüksel, H., “Türkiye’de Bazı Maden Makinalarında Gürültü Ölçümü ve Değerlendirilmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, (2017).
- [11] Erarslan, O., “Noise Monitoring and Control at the A.L.I. Soma Coal Region in Eynöz Mine”, *Master Thesis*, Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, (1995).
- [12] Sharma, O., Mohanan, V. and Singh, M., “Noise Emission Levels in Coal Industry”, *Applied Acoustics*, 54(1): 1-7, (1998).
- [13] Şahin, K., “Aydın Linyit İşletmesinde Gürültü Seviyesinin Araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (1998).
- [14] Şensöğüt, C., and Eralp, H., “Ömerler Yeraltı Ocağındaki Gürültü Ölçümleri ve Öneriler”, *Türkiye 11. Kömür Kongresi*, Bartın-Amasra, 43-52, (1998).
- [15] Çetin, O., “OAL’de Gürültüye Bağlı İşitme Kayıplarının İncelenmesi”, *TMMOB Maden Mühendisleri Odası Dergisi*, Eylül-Aralık, 39-45, (2000).
- [16] Ediz, İ.G., Beyhan, S., Akçakoca, H., ve Sarı, E., “Madencilikte Gürültüye Bağlı İşitme Kayıplarının İncelenmesi” *Türkiye 13. Kömür Kongresi*, Zonguldak, 13-22, (2002).
- [17] McBride, D. I., “Noise-induced Hearing Loss and Hearing Conservation in Mining”, *Occupational Medicine*, 54(5): 290-296, (2004).
- [18] Şensöğüt, C. ve Çınar, İ., “Açık Ocaklarda Gürültü Yayılımının Geliştirilen Bir Model ile İncelenmesi”, *Madencilik*, 45(3): 27-33, (2006).
- [19] Şensöğüt, C. and Çınar, İ., “An Empirical Model for the Noise Propagation in Open Cast Mines - A Case Study”, *Applied Acoustics*, 68(9): 1026-1035, (2007).
- [20] Şensöğüt, C., “Occupational Noise in Mines and Its Control – A Case Study”, *Polish Journal of Environmental Studies*, 16(6): 939-942, (2007).
- [21] Erol, İ. ve Su, O., “Mekanize Bir Yeraltı Maden İşletmesinde Gürültü Seviyelerinin İncelenmesi”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(2): 191-200, (2015).
- [22] Parnell, J., “Acoustic Signature of Open Cut Coal Mines” *Proceedings of Australian Acoustical Society Conference*, Hunter Valley, Australia, (2015).
- [23] Dereköy, F.S., “Bir Mermer Fabrikasındaki Gürültünün Çalışan İşçiler Üzerindeki Odyolojik Etkileri”, *Kulak Burun Boğaz Klinikleri*, 2(1): 7-10, (2000).
- [24] Şengün N., Altındağ R., Demirdağ S. ve Koççaz C.E., “Mermer İşleme Fabrikalarında Oluşan Gürültü Kirliliğinin İşçi Sağlığı ve İlgili Mevzuat Açısından Değerlendirilmesi”, *İ.T.Ü. 12. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 427-432, (2010).
- [25] Çınar İ., ve Şensöğüt C., “Mermer Hazırlama Tesislerinde Oluşan Gürültünün İşçiler Üzerindeki Maruziyet Değerlerinin Belirlenmesi”, *Maden*

- İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu**, Adana, 335-344, (2015).
- [26] Taştan H.T., “Granit Fabrikalarında Gürültü Maruziyetinin Değerlendirilmesi”, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, **İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi**, Ankara, (2016).
- [27] Ergün, F., Toprak, R. ve Aktürk, N., “Açık Ocak Maden İşletmelerinin Neden Olduğu Çevresel Gürültü”, **Hacettepe Üniversitesi Çevre Bilimleri**, 6: 1-9, (2004).
- [28] Mutlu, A., “Madencilikte Gürültüye Bağlı İşitme Kayıplarının Tespiti: Taş Kırma Eleme Tesisi Örneği”, **Yüksek Lisans Tezi**, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2010).
- [29] Kosala, K. and Bartłomiej, S., “Analysis of Noise Pollution in an Andesite Quarry with the Use of Simulation Studies and Evaluation Indices”, **International Journal of Occupational Safety and Ergonomics**, 22(1): 92-101, (2016).
- [30] Toppila, E., Pyykkö, I. and Pääkkönen, R., “Evaluation of The Increased Accident Risk From Workplace Noise”, **Finnish Institute of Occupational Health International Journal Of Occupational Safety And Ergonomics**, 15(2): 155-162, (2009).
- [31] Aybek, A. ve Arslan, S., “Bazı Tarıma Dayalı Sanayi Kuruluşlarında Gürültü Düzeyleri”, **Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi**, 8(2): 121-127, (2005).
- [32] Engel, J.R. and Kosala, K., “Sources of Vibroacoustic Hazards in Open-Pit Mines of Mineral Raw Materials”, **Archives of Acoustics**, 32(2): 251-262, (2007).
- [33] Kovalchik, P.G., Duda F.T. and Harper G.S., “Technique for estimating the sound power level radiated by pneumatic rock drills and the evaluation of a CSIR prototype rock drill with engineering noise controls”, **The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, 100: 295-299, (2009).
- [34] Çınar İ., and Şensöğüt C., “Evaluation of Noise Measurements Performed in Mining Sites for Environmental Aspects”, **International Journal of Environmental Research**, 7(2): 383-386, (2013).
- [35] Pleban, D., Piechowicz, J. and Kosala, K., “The Inversion Method in Measuring Noise Emitted by Machines in Opencast Mines of Rock Material”, **International Journal of Occupational Safety and Ergonomics**, 19(2): 321-331, (2013).
- [36] Akbay, D., “Antalya-Kemer-Tekirova Karayolu Güzergahında Bulunan Altan Ayağ Tünelindeki (T3 Tüneli) Delik Delme Performans Analizi”, **Yüksek Lisans Tezi**, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimler Üniversitesi, Isparta, (2013).
- [37] Özmen, A., “Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik Hükümlerinin Örneklerle ve Saha Uygulamalarıyla Açıklanması”, **İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi**, ÇSGB İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara, (2014).
- [38] Öztürk N., “Açık işletmelerde ağır iş makinesi operatörlerinin gürültü, titreşim ve toz maruziyetlerinin değerlendirilmesi”, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, **İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi**, Ankara, (2016).
- [39] Erdem B., Duran Z., Doğan T. ve Yüksel H., “Açık Maden İşletmelerindeki İş Makinesi Operatörlerinin Gürültü Maruziyetinin İncelenmesi”, **Bilimsel Madencilik Dergisi**, 56 (4): 148-165, (2017).
- [40] Ziel, A., “**Noise in Measurements**”, John Wiley & Sons Inc., New York, (1976).
- [41] Özgüven, N., “**Endüstriyel Gürültü Kontrolü**”, TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 1986.
- [42] Baranek, L.L. and Ver, I.L., “**Noise and Vibration Control Engineering; Principles and applications**”, John Wiley & Sons Inc., New York, (1992).
- [43] Malchaire, J., “**Sound measuring instruments, in Occupational Exposure to Noise: Evaluation, Prevention and Control**”, Publication Series from the Federal Institute for Occupational Safety and Health, Document published on behalf of the World Health Organization-Dortmund, Berlin, (2001).
- [44] Barron, R.F., “**Industrial Noise Control and Acoustics**”, Marcel Dekker Inc., New York, (2003).
- [45] Michael, P.L. and Michael, K.L., “**Noise Measurement in Occupational Hearing Loss**”, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, (2006).
- [46] Camkurt, M.Z., “İşyeri çalışma sistemi ve işyeri fiziksel faktörlerinin iş kazaları üzerindeki etkisi”, **TÜHİS İş Hukuku ve İktisat Dergisi**, 20(6): 80-106, (2007).
- [47] TS EN ISO 9612, “**Akustik-Çalışma ortamında maruz kalınan gürültünün belirlenmesi - Mühendislik yöntemi**”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (2009).
- [48] Pathak, K., “Modelling and Prediction of Environmental Noise Levels Near Mechanised Surface Mines and Quarries”, **PhD Thesis**, Imperial College, London, (1996).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



LPI based comparison of Turkey and Mexican logistics sector

Türkiye ve Meksika lojistik sektörünün lojistik performans endeksi bazlı karşılaştırılması

Yazar(lar) (Author(s)): Kürşat YILDIZ¹, Çağlar TABAK²

ORCID¹: 0000-0003-2205-9997

ORCID²: 0000-0002-9366-8776

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Yıldız K. and Tabak Ç., “LPI based comparison of Turkey and Mexican logistics sector” , *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1061-1067, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.479410

LPI Based Comparison of Turkey And Mexican Logistics Sector

Araştırma Makalesi / Research Article

Kürşat YILDIZ^{1*}, Çağlar TABAK²

¹Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

²Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Altyapı Yatırımlar Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 06.11.2018 ; Kabul/Accepted : 18.02.2019)

ABSTRACT

Transportation costs are the main parameters directly affecting the country's economy. This parameter is not only increasing day by day due to unsustainable fossil fuels, but also brings heavy burdens to economies. In case of Turkey, logistic strategies had to be considered inevitably. For this purpose, along general comparison made by taking the data of logistic performance index (LPI) issued biennially by World Bank into consideration, Mexico included in the same category in said index has been taken as the sample and then the logistic sector has been analyzed and compared. As a result, it was shown that Mexico and Turkey had poor transport infrastructure, lack of legislation, lack of independent logistics management and lack of independent port authority. In addition to them, it has been seen that the railway infrastructure should be less developed than behind the road infrastructure and the ports should be strengthened with highway-rail connections. Geostrategically, both countries have a similar structure but also have lack of data on the logistics sector. It has been asserted that regions for combined transport in both countries should be identified and logistics areas should be established.

Keywords: Logistics performance index, transport, competition, performance criteria.

1. INTRODUCTION

Increasing energy costs in recent years have increased transportation costs, while harming nature due to the use of fossil fuels. Reducing transport costs not only benefits the country's economy but also reduces external dependency on a sectorial basis and increases its relevance to the sector's energy resources. So the development in logistic sector and determining right strategies had become inevitable for developing countries and Turkey.

If all the activity from a production point of a commodity to the point of final consumption is defined as a supply chain, the delivery of this commodity to the final point can be defined as logistics procurement. These definitions should be applicable both in the field and in theory.

In recent years, public institutions and organizations, local governments and private sector representatives have gained momentum about logistics in our country. This brings with it the necessity of addressing industry problems with an academic perspective. The logistical performance index, published by the World Bank nearly every two years, provides information on countries' logistic sectors and investment opportunities.

In the light of this information, taking the basic criteria forming the index, this study has compared Mexico with Turkey existing within the same category with it.

2. PREVIOUS AND BASIC CONCEPTS

The concept of logistics, which has become a very big sector nowadays and which has influenced the country

economies to a great extent, has been derived from the Greek "logisticos" word. This word also means "science of calculation" and "ability to calculate" [1]. It was observed that logistics, which is used as a military concept until a recent period especially in our country, conforms with the management of all processes of taking a commodity from production area to consumption area [2]. Developed countries understood that they had to give primacy to the imperative of logistic transformation against development plans. This fact was included in Tenth Development Plan under the title of "Program for Conversion from Transportation to Logistics" [3]. All processes included in this cycle have been evaluated as supply chain mechanism.

The supply chain mechanism needs a management as it is in every mechanism [4]. Supply chain management is defined differently in many literature; all the processes from the supply chain mechanism to the delivery of the goods from the producer to the consumer, the organization between the enterprises and the whole process are not only ensured to be carried out strategically but also at the same time, it is defined as the totality which causes the customer satisfaction. Based on this definition, the supply chain mechanism and the management of it are composed of many components. However, transportation has the biggest share among these components. The main factors in the supply chain mechanism are raw material, business area, market and final consumer. It is clear that it is not possible to bring these factors together. In this case, the reality of transportation between the factors is inevitable.

Logistics activities that form the supply chain cycle are identified as raw material (final starting point), processing, packaging, market, distribution, routing [5], warehousing, customs, barcode, distribution and final

* Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-posta : kursaty@gazi.edu.tr

consumer. Each activity directly affects logistics costs. Tabak and Yıldız [6] have classified the logistics cost inputs for Turkey as certain and uncertain costs and they have indicated that the main factors in significant costs were transportation and logistics fields [7]. According to the logistic performance index issued by the World Bank, countries' scoring parameters are in parallel with the logistics activities that make up the supply chain cycle. Regular parameters are determined as clearing, infrastructure, timing, traceability, international transportation and logistics competition.

The overall LPI score is calculated by an econometric analysis of these six components [8]. When studies investigating the effect of LPI points on commercial activity were followed, it was found that a 10% increase in LPI score corresponds to a 69% increase in exports. The ratio of total logistics costs in fuel costs while watching the 60% level in Turkey, this rate is around 30% in developed European countries. On the other hand, the rate of inappropriate means of transport to intermodal transport in Turkey is 90%. As a result of that fact, Turkey's performance is decreased due to the delivery at competitive prices. Turkey's general interest in order to score the LPI levels to Malaysia, 14% in imports, while exports are required to provide 18% increase.

It is not sustainable to provide services with road transport for Turkish logistic sector. Road transport is also inappropriate for the competition with countries in higher levels in LPI index. In terms of LPI index, the infrastructure quality of different transportation types of these countries is higher in ports than the qualities in airway, railway and highway. The dependence on the highway in our country has caused a considerable cost burden on logistics due to the high fuel cost. Besides, it has been determined that the number of vehicles is 90% in order to be suitable for intermodal transportation. All of these have inevitably produced policies to facilitate intermodal transport and increase competition in our country [9].

Tabak and Yıldız [10] have examined the logistics of Germany, the Netherlands and Belgium, which took the

top three rankings in the year 2014 according to the Logistics Performance Index published by the World Bank on site and carried out a benchmarking study considering the 2016 LPI data. Questionnaires were made about the legal and structural status of the three countries that were sampled in the study. In addition, the values of LPI in these three countries were evaluated by correlation method and the most important parameters affecting performance criteria were determined. Primary strategies have been set forth according to the result of study.

3. INSTITUTIONAL INFRASTRUCTURE OF LOGISTICS

In order to be able to manage the logistics sector correctly and effectively, the structure of the institutions related to the sector needs to be examined. Although logistics performance influences customs, infrastructure, logistics competition, follow-up / tracking, timing and shipments, it seems that handling and managing them as a whole has a considerable precaution. In this regard, structures of Germany, Netherlands and Belgium which should be targeted by Turkey within the context of vision and mission have been examined, and primary strategies have been introduced in our previous study [10]. However, since we are in the class of middle-income countries and/or developing countries and due to the logistic geography and the geostrategic resemblance, it is thought that the examination of the logistic structure and plans of Mexico would contribute to the national strategy and development plans of our country.

The reason for the investigation of Mexico as a developing country such as Turkey has been determined according to the following parameters:

- It is classified within the same category of “developing countries” with Turkey in LPI (Table 1).
- Geostrategic affinity (Table 2).
- Closer Gross Domestic Product; Mexico's 2016 Gross Domestic Product value is 1,046.00 (\$ Billion), while Turkey's is 857.75 (\$ Billion) [11].

Table 1. Mexican logistic sector and its comparison with Turkish logistics

| Turkey | | | | | | | | |
|--------|------|---------|-----------------|------------|--------------|-------------|---------|----------|
| Year | Roww | Customs | Infrastructuree | Transportt | Competitionn | Monitoringg | Timingg | Countryy |
| 2007 | 34 | 33 | 39 | 41 | 30 | 34 | 52 | 150 |
| 2010 | 39 | 46 | 39 | 44 | 37 | 56 | 31 | 155 |
| 2012 | 27 | 32 | 25 | 30 | 26 | 29 | 27 | 155 |
| 2014 | 30 | 34 | 27 | 48 | 22 | 19 | 41 | 160 |
| 2016 | 34 | 36 | 31 | 35 | 36 | 43 | 40 | 160 |
| Mexico | | | | | | | | |
| Year | Row | Customs | Infrastructure | Transport | Competition | Monitoring | Timing | Country |
| 2007 | 56 | 63 | 53 | 54 | 57 | 48 | 51 | 150 |
| 2010 | 50 | 62 | 44 | 77 | 44 | 45 | 54 | 155 |
| 2012 | 47 | 66 | 47 | 43 | 44 | 49 | 55 | 155 |
| 2014 | 50 | 70 | 50 | 46 | 47 | 55 | 46 | 160 |
| 2016 | 54 | 54 | 57 | 61 | 48 | 42 | 68 | 160 |

Table 2. Geostrategic vicinity evaluation

| TURKEY | | | | MEXICO | | | |
|---|---|---|---|--|--|---|-------------------------------|
| Geostrategic Condition | | | | Geostrategic Condition | | | |
| North | South | East | West | North | South | East | West |
| Black Sea, Georgia | Mediterranean, Syria | Iraq, Azerbaijan, Iran | European Union, Aegean Sea | USA | Guatemala, Belize | Atlantic Ocean, Cuba | Pacific Ocean |
| EVALUATIONS | | | | | | | |
| Eastern countries like Black Sea and Russia have a strong country | Being a politically unstable country like the Mediterranean and Syria and being in a state of war | War in Iraq, political situations not in advanced level with Iran | The Aegean Sea in the West and a strong European Union practice | To be a strong country like USA in the north | South, Turkey's very good at political level, a similar figure to the southern Guatemala and Belize are unsubscribed | In the East, Russia bloc countries such as Cuba and the Atlantic Ocean a similar figure in Turkey | The Pacific Ocean in the West |

4. MEXICAN LOGISTIC SECTOR AND ITS COMPARISON WITH TURKISH LOGISTICS

The reasons for comparing the logistics sector between the two countries are given in detail in the previous section. In the light of these reasons, we personally participated in the roundtable workshop on the development of the logistics system and logistics system of Mexico in Mexico in March 2015. Taking the documents and information obtained under these subjects into consideration, logistic sector in Turkey has been compared.

Within the scope of the workshop, the effects of logistic performance on trade were emphasized. The reliability of

the logistic performance criteria has been questioned [12]. This reliability is said to depend on many variables. In Latin America, countries such as Mexico, Chile, and Panama have been required to focus on parameters such as pricing, scheduling, and infrastructure standards to determine their logistics performance. The Mexican Transport Institute has worked on shipping times, in case that the freights from China are transported through the United States and Mexico. It was stated that if the shipment was carried out through the state of Aguascalientes, it would be faster. Schematically, this suggestion was confirmed on the map (Figure 1)

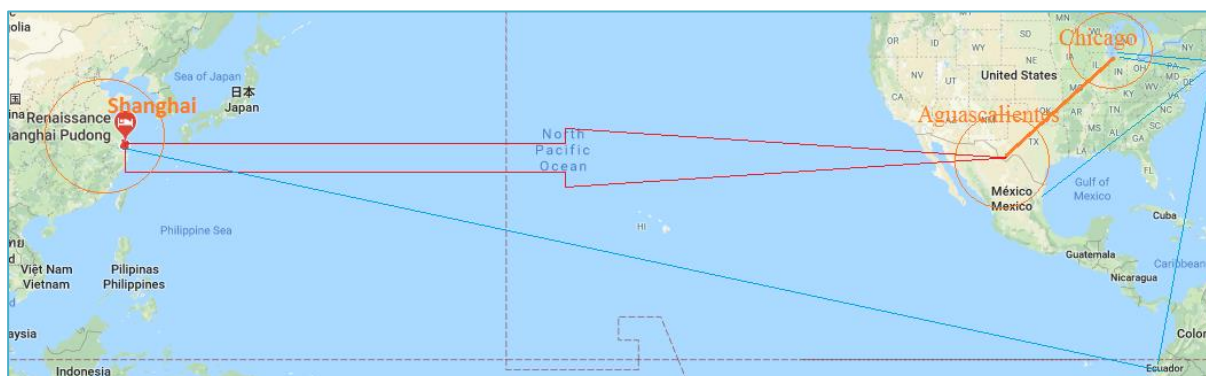


Figure 1. Freight route of Shanghai-Chicago

The duration for transport of any commodity produced in any region of China to Shanghai Port is one day or five days depending on the situation of freight and region. Handling period of freight coming to the port is three days on average; the period for the arrival of product

from Shanghai Port to the USA via Panama Canal is ten days. It was indicated that port activities in the USA varied between 1 and 5 days. This period can be prolonged up to nine days due the congestion in railroad activities. It was stated that four days were required to

transport the freight handled in the port to Chicago but this period could be 9 days due to the traffic density. When all these periods are taken into consideration, average period of a freight coming from a production area to the USA can be 19 days or a little bit more, but if we consider the delays, this period can be 33 days [13]. If freights come to the state of Aguascalientes without transporting it directly to the USA, the handling requires one day in Mexican port. This period can be 3 days according to road traffic. If the United States-Mexico border is taken into consideration, border crossing transactions, customs transactions etc. require one day at best. Road transport requires one day or three days. In that case, if there is no delay, the period would be decreased of three days. Even in case of delay, it was shown that decrease would be seven days [13].

The study was done in terms of duration of working period and no cost analysis was done. The distribution of road freight over Mexico is the most skeptical aspect of working. When the road transport is compared with railroad transport in terms of depreciation, the cost of fuel, and the amount of freight transported in a single trip, the disadvantages of road transport should be stated. Because the freight that goes directly to the US may require more time, but it is provided by the combination of sea and rail, which are the most economical transport types in transport modes. Considering this situation, it is necessary to work more thoroughly.

On the other hand, it is inevitable that the Panama Canal is of vital importance for the development of Latin American logistics activities. This once again emphasizes the importance of marine transportation in freight transport.

Considering the above studies, there are three alternatives from China to Europe for Turkey. First one is freight corridor coming through Turkey located on the first middle zone, second one is freight transport realized through Russia, and third one is sea transport made on the ocean [14]. Again, in the study made in Mexico, a classification is made in terms of economic and monetary values, consumption, customs zones and multilateral free trade zones, it is seen that Turkey is located in the region in which the customs transactions are so dense. Then Turkey should be taken out of that region and located in the region in which developed countries are located and economic relations are powerful.

As it is known, Turkey is located in the customs union. But we need to be on the side of multilateral free trade agreements with the aim of strengthening logistical activities and developing more frequent trade with Latin America.

The weaknesses of the Latin American logistics industry in the study conducted by the Mexican Institute of Transportation are as follows.

- There is no perfect alignment between the competition strategy and the supply chain strategy,
- The lack of statistical data for the logistics sector,

- Inadequate compatibility between the public and private sector and inadequate data transfer,
- Firm lacks sectorial analysis.

The parameters that increase logistics costs in Latin America are as follows.

- Problems encountered in infrastructure,
- Weakness in logistics connections,
- Problems in border crossings,
- A solid implementation system in transport types,
- Providing illegal logistics and transportation services,
- Implementing different legislation between countries,
- Security issues insufficient traceability in the supply chain [12].

On the other hand, Mexico is making national logistics master plan as another important example for Turkey. Mexico's backbone in foreign trade is composed of transportation and logistics activities. The work of the Mexican National Infrastructure Plan is also ongoing and includes the period of 2014-2018. When the national plan is examined, it is seen that the investments are on ports and highways. The National Infrastructure Plan focuses on the following two important issues [15].

- Improving the combined transport of Mexico, increasing competition in the performance index, increasing the value added of logistics activities, enhancing transport safety and overseeing all investments in line with economic developments,
- To create a competitive, sustainable, secure and flexible logistics infrastructure.

Taking all these points into consideration, Mexico was intended to prioritize investments and to make National Transportation and Logistics Master Plan at the contest of the Mexican Institute of Transportation to draw up future projections by ensuring data collection in the logistics sector and strengthening the transportation infrastructure of the industrial zones and strengthening of the infrastructure in the logistics sector. Inter-city demand forecasts have been made and planning studies have been initiated to deal with the investments of transportation modes gradually [16].

Mexico has over 80 logistical potential areas, including 15 major logistics nodes and potential logistics nodes (Figure 2). On the map, there are logistic areas expressed by dots and logistic clusters around. It is aimed that this area and the clusters are interconnected by rail as much as possible. This target is also considered to be strengthened by road.

A study has been carried out by the Mexican Institute of Transportation to determine the unit costs of freight transported by road and rail by lengths of km, although there are no legal regulations on combined transport in Mexico yet. The railway freight transport rate in the study is around 4% and freight transport is predominantly made by road transport [17]



Figure 2. Point representation of logistic areas in Mexico

Ports are an important parameter for improving logistical performance. The performances of Mexico's ports are as follows (Table 3).

Handling rates realized in five main ports have been given in Table 3. When it is compared with Turkey, the quantity of freight handled in Turkey is 714.000

containers (TEU), but over 2 million TEU is handled in only Manzanillo Port of Mexico [18,19].

Quantity of freight handled in Mexican ports is higher than the quantity in Turkey. The main reason of that is Mexico is surrounded with ocean in two sides and the fact that freights coming from Far East can be transported to Northern regions of the USA via Mexican ports. Although the transportation is fast, non-economic situations can be faced due to the delivery via road transport.

Table 3. Cargoes carried at Mexico's ports in 2015

| Port | Transshipped Containers (TEU) | Transshipped Freight at ports in 1h (Tons) | Transshipped packages at ships at ports in 1h (Tons) | Handled at one hour (Tons) | Transshipped freight by cranes in 1h (Tons) |
|-----------------|-------------------------------|--|--|----------------------------|---|
| Ensenada | 139 938 | 34.6 | 37.8 | 46.1 | 23.1 |
| Lazaro Cardenas | 996 654 | 70.2 | 85.3 | 110.6 | 37.6 |
| Manzanillo | 2 368 741 | 46.0 | 53.0 | 62.0 | 23.0 |
| Progreso | 65 583 | 8.3 | 9.9 | 33.9 | 29.5 |
| Veracruz | 847 370 | 46.7 | 61.2 | 83.8 | 26.2 |

5. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

As a result, when we look at Mexico's and Latin America's logistics performance, it is possible to say that they showed similar performance with Turkey. Logistics

Performance Index published by the World Bank indicates that Mexico and Latin American countries lag behind Turkey in general. One of the biggest causes is the inadequate transportation infrastructure and the inability

to complete the legal legislation. The workshop in Mexico stated that there is no legislation for combined transport and that there is no legal framework for logistics. Moreover, during the workshop conducted by the Mexican Institute of Transportation, an independent logistics structure could be established. Compared with Turkey, with the absence of an independent body for the port authorities, Mexico has no independent structure that will manage logistic sector, rail freight ratio is at approximately 4%, and it is required to strengthen the ports and the connections between roads and railroads. Similar problems are observed in Turkey.

It is also possible to say that the economic level of the Latin American countries is highly influenced by logistics. It is difficult to say that Mexico's largest trading partner is America, while it is the same as other South American countries and Guatemala in the south. Thus, similar to a disorderly restructuring is also available in Turkey. While the northern part of the country has developed in terms of logistic cluster and railway connection, it is difficult to say the same thing for the southern parts. It is possible to say that the presence of countries with very low income levels in the eastern part of the country, such as Cuba and Haiti, could affect Mexico's international trade.

Therefore, the strengthening of the railway connection of the country needs to be strengthened rapidly by the ports-highway-railway connections, and the necessary legal arrangements must be completed quickly. On the other hand, it is stated that the starting and ending points of road transport in the country cannot be determined. A master plan study is carried out with the aim of collecting sufficient data for this purpose. Because of the lack of sufficient data on freight transport, it has been pointed out that it is difficult to apply the theoretical studies in practice. Nevertheless, it is very important in Mexico, where the density of the ports is very high, that ports are strengthened by railways, that border crossing times are further accelerated, and that customs procedures are revisited.

There are many similarities between Mexico and Turkey. Turkey's eastern region has also underdeveloped system and western region is highly developed. There is irregular structure. Again, ports in Turkey cannot operate with sufficient capacity and they have not enough efficiency. We can also tell that there is not sufficient information about logistic sector in Turkey. Same is true for Mexico. Thus it is apparent that we should gather data about the sector by examining the other countries' systems. On the other hand, freight transport rates in Turkish railroad transport is so low, therefore the connections between railroads and ports should be strengthened. Besides, as it is observed in Mexico, cost analysis should be made for all regions, the most advantaged regions should be identified for combined transportation, and proper logistic areas should be established here.

In addition, transportation master plans should be considered when creating logistics areas [20]. Because

The Transportation Master Plan, includes the processes of producing, election and evaluating process for scenarios that can respond to transportation problems.

REFERENCES

- [1] Voortman, C., "Global logistics management", Lansdowne, *Juta and Company Ltd.*, 0 7021 6641 3, Cape town South Africa, (2004).
- [2] Kumar V., Reinartz, W., "Customer relationship management: concept, strategy, and tools", Second edition, 978-3-642-20109-, *Springer*, Berlin, (2012).
- [3] Tabak Ç., "Choosing location, integration with types of transport and modeling of logistics activity areas in Turkey", *Ph. D. Thesis*, Gazi university graduate school of natural and applied sciences, Ankara, Turkey, (2017).
- [4] Mentzer J. T., DeWitt W., Keebler J. S., Min S., Nix N. W., Smith, C. D. and Zacharia Z. G., "Defining supply chain management", *Journal of Business Logistics*, 22(2): 1-25, (2001).
- [5] Atmaca E., Vardar S., Akbabaöz S., Vural A., Uruş G., "Solution Approach to Vehicle Routing Problem for White Ware Authorized Service At Ankara", *Journal of Polytechnic*, 18 (2) : 99-105, (2015).
- [6] Tabak Ç., Yıldız, K., "Türkiye'de lojistiğin kurumsal yapılanması", *11. Ulaştırma Kongresi*, İstanbul, 151-168, (2015).
- [7]. <https://ipi.worldbank.org/international/global/2016>. (12.12.2018).
- [8] Ojala L. and Celebi D., "Logistics Performance Index and Drivers of Logistics Performance" Turku School of Economics, Finland and Istanbul Technical University, Turkey; *International Transport Forum at the OECD, Mexican Institute of Transportation* Sanfandila, Queretaro, (2015).
- [9] Cebeci D., "Lojistik Performans Endeks Ölçütleri", *Ulaştırma – Lojistik Ağları ve Planlama 21. Yüzyıl İçin Planlama*, Ankara, (2015).
- [10] Tabak, Ç., Yıldız K., "Turkey's logistics impact compared to the Netherland, Germany and Belgium", *International Journal of Logistics Systems and Management*, (2017).
- [11] <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Ftradingeconomics.com%2Fmexico%2Fgdp&date=2017-11-21> (21.11.2017).
- [12] Hausman L., "The impact of logistics performance on trade", *Production and Operations Management*, 22(2): 236-252, (2013).
- [13] Cedillo G., "Supply Chain Performance Measurement in Latin America", *Prepared for the Roundtable on Logistics Development Strategies and their Performance Measurements*, Queretaro, Mexico, (2015).
- [14] Kirillova A. "Development of the international transport corridors in the transport system of the Russian Federation", (2017).
- [15] http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.itfoecd.org%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fdocs%2F15cspa_mexicologistics.pdf&date=2018-02-14. (14.12.2017).

- [16]<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fimt.mx%2Farchivos%2Fpublicaciones%2FManual%2Fmn2013.pdf&date=2018-02-14>, (14.12.2017)
- [17]<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.itfoecd.org%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fdocs%2Flogistics-strategy-performance-management.pdf&date=2018-02-14>, (14.12.2017).
- [18]<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.gob.mx%2Fsct%2Farchivo%2Fdocumentos&date=2017-11-21> (11.20.2017).
- [19]<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.ubak.gov.tr%2F+&date=2017-11-20>, (20.11.2017).
- [20] Orman A., Düzkaya H., Ulvi H., Akdemir F., “Multi-Criteria Evaluation by Means of Using the Analytic Hierarchy Process in Transportation Master Plans: Scenario Selection in the Transportation Master Plan of Ankara”, *Gazi University Journal of Science*, 31(2): 381-397, (2018).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Thermal buckling analysis of axially layered functionally graded thin beams under clamped-clamped boundary conditions

Tutulu-tutulu sınır şartları altında aksenal yönde tabakalı fonksiyonel derecelendirilmiş ince kirişlerin termal burkulma analizi

Yazar(lar) (Author(s)): Savaş EVRAN

ORCID: 0000-0002-7512-5997

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Evran S., “Thermal buckling analysis of axially layered functionally graded thin beams under clamped-clamped boundary conditions”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1069-1074, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.498684

Thermal Buckling Analysis of Axially Layered Functionally Graded Thin Beams under Clamped-Clamped Boundary Conditions

Araştırma Makalesi / Research Article

Savaş EVRAN*

Vocational School of Canakkale Technical Sciences, Department of Machine and Metal Technologies, Canakkale Onsekiz Mart University, Türkiye

(Geliş/Received : 17.12.2018 ; Kabul/Accepted : 27.02.2019)

ABSTRACT

In the present article, the critical buckling temperature of axially layered functionally graded thin beams for the first mode was studied under clamped-clamped boundary conditions. The beams were made to be three layers using functionally graded materials with ceramic and metal systems in the axial direction. Analyses were performed using finite element and Taguchi methods. The beam configurations were designed based on Taguchi L_9 orthogonal array in order to detect the maximum critical buckling temperature and were analyzed using finite element software ANSYS. Analysis of signal-to-noise ratio was utilized to determine the layers with optimum levels and the influence of ceramic and metal materials in each layer. Analysis of Variance at the 95 % confidence level was employed in order to select the most significant layers and their percent contribution on response characteristic. The optimum result of the critical buckling temperature was predicted based on the 95 % confidence intervals of confirmation analysis and population.

Keywords: Thermal buckling, functionally graded materials, finite element analysis, beam.

Tutulu-Tutulu Sınır Şartları Altında Eksenel Yönde Tabakalı Fonksiyonel Derecelendirilmiş İnce Kirişlerin Termal Burkulma Analizi

ÖZ

Sunulan makalede, birinci mod için eksenel yönde tabakalı olarak fonksiyonel derecelendirilmiş ince kirişlerin kritik burkulma sıcaklığı tutulu-tutulu sınır şartları altında çalışılmıştır. Kirişler eksenel yönde seramik ve metal sistemli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler kullanılarak üç tabakalı olarak yapılmıştır. Analizler sonlu elemanlar ve Taguchi metotları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Maksimum kritik burkulma sıcaklığı tespit etmek için kiriş konfigürasyonları Taguchi L_9 ortogonal diziyeye bağlı tasarlanmıştır. Sinyal gürültü oran analizi her tabakadaki seramik ve metal malzemelerin etkisini ve optimum seviyeli tabakaları değerlendirmek için kullanıldı. % 95 güven seviyesinde Varyans analizi yanıtlar üzerinde en etkili tabakalar ve onların yüzde katkılarını seçmek için uygulanmıştır. Kritik burkulma sıcaklığının optimum sonucu doğrulama analizinin ve popülasyonun % 95 güven aralığına dayanılarak tahmin edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Termal burkulma, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, sonlu elemanlar analizi, kiriş.

1. INTRODUCTION

Temperature can be the important factor for buckling analyses of the beams for mechanical engineering. The high increase in the temperature may affect the buckling behavior directly. This situation can explain the mechanical and thermal properties of the materials. The materials with temperature resistant and high strength may be required in order to resolve this situation. In the literature, there are many studies about thermal buckling and post-buckling of the beams and plates made of functionally graded materials. Fu et al. [1] analyzed the thermal buckling behavior of functionally graded beams having longitudinal crack and compare results obtained

from classical Euler beam theory and Timoshenko beam theory. In addition, they used analytical and numerical solutions based on thermal load. Kiani and Eslami [2] carried out the buckling behavior of functionally graded beams subjected to different types of thermal loading under different boundary conditions and they used Euler-Bernoulli beam theory for the derivation of equations. Sun et al. [3] evaluated the thermal buckling and post-buckling of Timoshenko beams designed using functionally graded materials on nonlinear elastic foundation. Majumdar and Das [4] presented a study including the thermal buckling load of functionally graded beams with clamped-clamped boundary conditions and they used linear and nonlinear thermal gradient in thickness direction for analyses. Eslami et al. [5] investigated the thermal buckling behavior of

*Sorumlu Yazar (Corresponding author)
e-posta : sevran@comu.edu.tr

functionally graded beams under different boundary conditions. Li et al. [6] studied the thermal post-buckling behavior of functionally graded Timoshenko beams and they used transversely non-uniform temperature rise for analysis. Wattanasakulpong et al. [7] presented an improved third-order shear deformation theory in order to analyze the thermal buckling and vibration behaviors of the functionally graded beams and they used different boundary conditions. Ghannadpour et al. [8] investigated the buckling behavior of rectangular plates designed using functionally graded materials with ceramic and metal materials under different thermal loadings and they used different boundary conditions. Javaheri and Eslami [9] studied the thermal buckling characteristics of functionally graded rectangular plates based on various

thermal loading. It can be seen from mentioned literature that there are many studies with thermal buckling analysis functionally graded beams and plates. In this study, the critical buckling temperature of axially layered functionally graded thin beams for the first mode was evaluated under clamped-clamped boundary conditions using finite element and Taguchi methods.

2. MATERIAL and METHOD

Analysis of critical buckling temperature of the axially layered functionally graded thin beams was conducted based on Aluminum (metal) and Zirconia (ceramic) materials. The mechanical and thermal properties of the both materials are listed in Table 1.

Table 1. Mechanical and thermal properties of Aluminum and Zirconia [10]

| Materials | Young's Modulus (GPa) | Poisson's Ratio (-) | Thermal Expansion Coefficient ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) |
|-----------|-----------------------|---------------------|--|
| Aluminum | 70 | 0.3 | 23.0 |
| Zirconia | 151 | 0.3 | 10.0 |

Each layer of the axially layered functionally graded thin beams was modelled using various percent volume fractions of Aluminum and Zirconia materials. The mechanical and thermal properties of the layers were achieved based on a simple rule of mixture of composite materials. Poisson's ratios for both materials were constant and were used to be 0.3 as shown in Table 1. The effective material properties P_f of each layer of axially layered functionally graded thin beams, such as Young's modulus, and thermal expansion coefficient, may be solved as shown in Equation 1 [11].

$$P_{ef} = \sum_{j=1} P_j V_{fj} \quad (1)$$

According to Equation 1, P_j and V_{fj} are utilized to be the material properties and volume fraction for the

constituent material j respectively and then the sum of the volume fractions for all the constituent materials can be solved to be 1, with regard to Equation 2 [11].

$$\sum_{j=1} V_{fj} = 1 \quad (2)$$

After the effective material properties of the layers were calculated based on Equation 1 and 2, the beam configurations were made using Taguchi's L9 orthogonal array. This array has three levels for each control factor. Thus the beams configurations with different levels and various layers is made. Ceramic volume fractions in layers were carried out based on 7 % increase. The layer and their levels were given in Table 2.

Table 2. Layers and their levels

| Layer | Symbol | Level | | |
|---------|--------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | Level 1 | Level 2 | Level 3 |
| Layer 1 | L1 | 7 % Aluminum 93 % Zirconia | 14 % Aluminum 86 % Zirconia | 21 % Aluminum 79 % Zirconia |
| Layer 2 | L2 | 28 % Aluminum 72 % Zirconia | 35 % Aluminum 65 % Zirconia | 42 % Aluminum 58 % Zirconia |
| Layer 3 | L3 | 49 % Aluminum 51 % Zirconia | 56 % Aluminum 44 % Zirconia | 63 % Aluminum 37 % Zirconia |

The optimum response characteristics of the beam configurations for maximum temperature were carried out using "higher is better" quality characteristic as given in Equation 3 [12].

$$(S/N)_{HB} \text{ for } \Delta T = -10 \cdot \log \left(n^{-1} \sum_{i=1}^n (y_i^2)^{-1} \right) \quad (3)$$

In Equation 3, n is taken to be the number of numerical analyses in a trial and y_i also considered to be i th data studied. The statistical analyses were carried out using Minitab 15 software [15].

3. FINITE ELEMENT SOLUTION

Numerical analyses were performed using finite element software ANSYS Mechanical APDL [14]. Structure analysis was used based on temperature. The axially layered functionally graded thin beams were modelled according to BEAM189 element type. This element is described to be quadratic 3-node beam element for three dimension and also it is related to Timoshenko beam theory [13]. In modelling, each layer was performed according to 70 mesh and so the mesh operations of the beam configurations were carried out based on 210 mesh totally. In the finite element analysis, rectangular beams were used. Each beam has clamped-clamped boundary conditions. The length, cross section base, and cross section height of the beams are 210, 8, and 2 in mm, respectively. In additions, beam configurations are made

using three layers with ceramic and metal systems. The axially layered FG thin beam type is presented in Figure 1.



Figure 1. Axially layered functionally graded thin beam with clamped ends

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

Analysis The beam configurations were created according to Taguchi’s L9 orthogonal array and numerical results of the thermal buckling temperatures were calculated. In order to study the critical buckling temperature of the beams, numerical data analyzed were convert to S/N ratio values based on “higher is better” characteristic. The numerical temperatures for first mode and S/N ratio results were given in Table 3.

Table 3. Critical buckling temperatures and S/N ratio data

| Trial No. | Control Factors | | | Results | |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------|
| | Layer 1 | Layer 2 | Layer 3 | Temperature ΔT (°C) | S/N Ratio η (dB) |
| 1 | L1 ₁ | L2 ₁ | L3 ₁ | 15.5848 | 23.8540 |
| 2 | L1 ₁ | L2 ₂ | L3 ₂ | 16.2064 | 24.1937 |
| 3 | L1 ₁ | L2 ₃ | L3 ₃ | 16.8684 | 24.5415 |
| 4 | L1 ₂ | L2 ₁ | L3 ₂ | 15.9467 | 24.0534 |
| 5 | L1 ₂ | L2 ₂ | L3 ₃ | 16.5943 | 24.3992 |
| 6 | L1 ₂ | L2 ₃ | L3 ₁ | 16.4856 | 24.3421 |
| 7 | L1 ₃ | L2 ₁ | L3 ₃ | 16.3557 | 24.2734 |
| 8 | L1 ₃ | L2 ₂ | L3 ₁ | 16.2352 | 24.2092 |
| 9 | L1 ₃ | L2 ₃ | L3 ₂ | 16.8892 | 24.5522 |
| Overall Mean (\bar{T}) | | | | 16.3518 | |

In order to see the effect of the temperature based on first mode on the axially layered FG thin beams, the numerical results in Table 3 were presented in Figure 2 visually. According to Figure 2, the maximum affected layers were monitored on middle layers

In order to observe the influence of layers with different levels on the thermal critical buckling response, finite element analyses were conducted based on Taguchi’s L9 orthogonal array. The average results of critical buckling temperatures for each layer at each level based on finite element data and S/N data were calculated using Minitab 15 software. The results solved are given in Table 4.

4.1 Identification of Layers with Optimum Levels and Their Effects

Table 4. Response table for S/N ratio and raw values

| Level | S/N ratio in dB | | | Means in °C | | |
|-------|-----------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| | L1 | L2 | L3 | L1 | L2 | L3 |
| 1 | 24.20 | 24.06 | 24.14 | 16.22 | 15.96 | 16.1 |
| 2 | 24.26 | 24.27 | 24.27 | 16.34 | 16.35 | 16.35 |
| 3 | 24.34 | 24.48 | 24.40 | 16.49 | 16.75 | 16.61 |
| Delta | 0.15 | 0.42 | 0.27 | 0.27 | 0.79 | 0.5 |
| Rank | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 |

According to Table 4, the optimum levels for the maximum thermal buckling temperature of the axially layered FG thin beams were obtained using third levels of layers. The increase of the percent ceramic volume

fraction in layer causes the increase of the critical buckling temperature of axially layered functionally graded thin beams according to first mode.

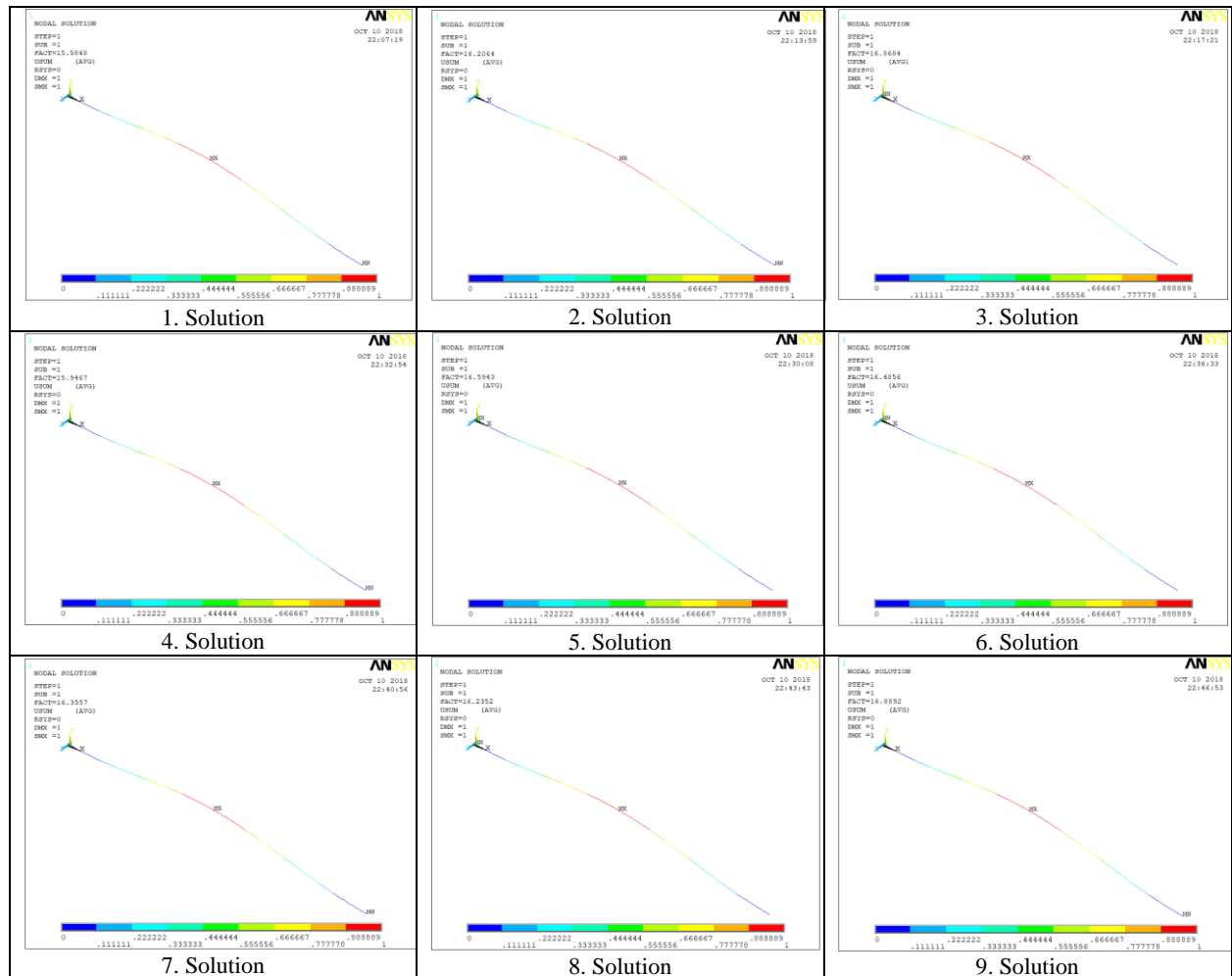


Figure 2. First mode shapes of the axially layered FG thin beams with clamped ends

4.2 Analysis of Variance for Critical Buckling Temperature

Analysis of variance (ANOVA) was assessed in order to investigate the significance of the control parameter such as L1, L2, and L3 towards critical buckling temperature of axially layered FG thin beams. Analyses was carried out using finite element results at 95 % confidence level

and ANOVA results obtained were demonstrated in Table 5. From this table, it is clear that layers affect the mean and then layers are significant parameters on response due to $P < 0.05$. In addition, L1 with 7.93 %, L2 with 65.18 %, and L3 with 26.88 % contribution ratios are the most affected parameters, respectively. In analysis, percent error data was found as 0.01 %.

Table 5. ANOVA results

| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj Ms | F | P | % Effect |
|--------|----|---------|---------|---------|----------|-------|----------|
| L1 | 2 | 0.11262 | 0.11262 | 0.05631 | 1342.27 | 0.001 | 7.93 |
| L2 | 2 | 0.92531 | 0.92531 | 0.46266 | 11028.47 | 0.000 | 65.18 |
| L3 | 2 | 0.38151 | 0.38151 | 0.19076 | 4547.12 | 0.000 | 26.88 |
| Error | 2 | 0.00008 | 0.00008 | 0.00004 | | | 0.01 |
| Total | 8 | 1.41953 | | | | | 100 |

S = 0.00647697, R-Sq = 99.99%, R-Sq(adj) = 99.98%

4.3 Estimation of Optimum Results

The optimal result for maximum critical buckling temperature is predicted using significant layers based on $P < 0.05$ and then layers with optimum levels such as L_{13} , L_{23} , and L_{33} were used. Estimated mean of the critical buckling temperature can be expressed using Equation 4 [12].

$$\mu_{\Delta T} = \bar{L}_{13} + \bar{L}_{23} + \bar{L}_{33} - 2\bar{T} \tag{4}$$

In Equation 4, $\bar{T} = 16.3518$ specifies overall mean of the critical buckling temperature based on Taguchi’s L_9 orthogonal array and it is taken from Table 3. Also, $\bar{L}_{13} = 16.49$, $\bar{L}_{23} = 16.75$, and $\bar{L}_{33} = 16.61$ denotes the average results of critical buckling temperature for finite element raw data at third level of L_1 , L_2 , and L_3 respectively and these values are taken from Table 4. According to Equation 4, $\mu_{\Delta T}$ is calculated to be 17.1464 °C and then the 95 % confidence intervals of confirmation analyses (CI_{CA}) and population (CI_{POP}) are solved by using Equation 5 [12] and Equation 6 [12], respectively.

$$CI_{CA} = \left(F_{\alpha;1;n_2} V_{error} \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right] \right)^{1/2} \tag{5}$$

$$CI_{POP} = \left(\frac{F_{\alpha;1;n_2} V_{error}}{n_{eff}} \right)^{1/2} \tag{6}$$

$$n_{eff} = \frac{N}{(1 + T_{DOF})} \tag{7}$$

where, $\alpha = 0.05$ denotes risk and $n_2 = 2$ typifies the error data for degree of freedom in Table 5. Error data for variance is typified as V_{error} and is used as 0.00004 from Table 5. $R = 1$ is sample size of confirmation analyses. $F_{\alpha;1;n_2}$ is presented as $F_{0.05;1;2}$ and is determined to be

18.5 [12] according to F ratio results for the 95 % CI ($\alpha=0.05$). Sum of number of the results is typified as N and is take to be 9 from Table 3. Sum of degree of freedom for significant control parameters is presented as T_{DOF} and is calculated to be 6. n_{eff} is solved to be 1.286 so CI_{CA} and CI_{POP} are found to be ± 0.0363 and ± 0.0240 respectively. Thus, the estimated confidence interval based on confirmation analyses [12] is:

$$Mean \mu_{\Delta T} - CI_{CA} < \mu_{\Delta T} < CI_{CA} + Mean \mu_{\Delta T}$$

The population for the 95 % confidence interval [12] is:

$$Mean \mu_{\Delta T} - CI_{POP} < \mu_{\Delta T} < CI_{POP} + Mean \mu_{\Delta T}$$

Finite element and predicted results for optimal critical buckling temperature according to confidence intervals were listed in Table 6. In addition, optimum result based on finite element software ANSYS was given in Figure 3 visually.

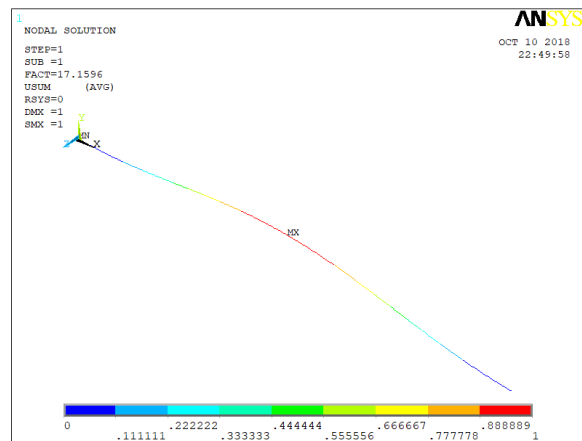


Figure 3. The optimum numerical result

Table 6. Finite element and predicted results

| Optimal Layers | Finite Element Result (°C) | Predicted Result (°C) | Estimated Confidence Intervals for 95% Confidence Level |
|--------------------------------|----------------------------|-----------------------|---|
| L_{13} - L_{23} - L_{33} | 17.1596 | 17.1464 | $17.1101 < \mu_{\Delta T} < 17.1827$ for CI_{CA} $17.1224 < \mu_{\Delta T} < 17.1704$ for CI_{POP} |

5. CONCLUSIONS

In this study, the critical buckling temperature of axially layered functionally graded thin beams for first mode was investigated according to clamped-clamped boundary conditions. The beams were made from the functionally graded materials containing ceramic and metal materials in the axial direction. Analyses were carried out based on finite element and Taguchi methods. The beam configurations were determined based on Taguchi L_9 orthogonal array in order to select the maximum critical buckling temperature and numerical analysis was performed using finite element software ANSYS. Analysis of signal-to-noise ratio was utilized to study the layers having the optimum levels and the effects of ceramic and metal materials in each layer. Analysis of

Variance for the 95 % confidence level was carried out in order to determine the most significant layers and their percent contribution on responses. This study concludes that the increase of the percent ceramic volume fraction in layer provides the increase of the critical buckling temperature of axially layered functionally graded thin beams based on first mode and thus optimum result for maximum critical buckling temperature was obtained using layers having the third levels. The layers were carried out to be control parameters with significant effects since P data is smaller than 0.05 value according to ANOVA at 95 % confidence level. The maximum affected layers were monitored on middle layers. In addition, effect ratios of Layer 1, Layer 2, and Layer 3 on responses were found to be 7.93 %, 65.18 %, and 26.88

%, respectively. The optimum critical buckling temperatures based on finite element and predicted results were solved to be 17.1596 and 17.1464 respectively. In addition, 95 % confidence intervals of confirmation analysis and population were determined to be $17.1101 < \mu_{\Delta T} < 17.1827$ for CI_{CA} and $17.1224 < \mu_{\Delta T} < 17.1704$ for CI_{POP} respectively.

REFERENCES

- [1] Fu Y., Chen Y. and Zhang P., "Thermal buckling analysis of functionally graded beam with longitudinal crack". *Meccanica*, 48(5): 1227-1237, (2013).
- [2] Kiani Y. and Eslami M.R., "Thermal buckling analysis of functionally graded material beams". *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 6(3): 229-238, (2010).
- [3] Sun Y., Li S.-R. and Batra R.C., "Thermal buckling and post-buckling of FGM Timoshenko beams on nonlinear elastic foundation". *Journal of Thermal Stresses*, 39(1): 11-26, (2016).
- [4] Majumdar A. and Das D., "A study on thermal buckling load of clamped functionally graded beams under linear and nonlinear thermal gradient across thickness". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 232(9): 769-784, (2018).
- [5] Eslami M.R., Shahsiah R. and Nikbin K.M., "Thermal Buckling of Functionally Graded Beams". *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*, 10(2): 65-81, (2009).
- [6] Li S.-R., Zhang J.-H. and Zhao Y.-G., "Thermal post-buckling of Functionally Graded Material Timoshenko beams". *Applied Mathematics and Mechanics*, 27(6): 803-810, (2006).
- [7] Wattanasakulpong N., Gangadhara Prusty B. and Kelly D.W., "Thermal buckling and elastic vibration of third-order shear deformable functionally graded beams". *International Journal of Mechanical Sciences*, 53(9): 734-743, (2011).
- [8] Ghannadpour S.A.M., Ovesy H.R. and Nassirnia M., "Buckling analysis of functionally graded plates under thermal loadings using the finite strip method". *Computers & Structures*, 108-109: 93-99, (2012).
- [9] Javaheri R. and Eslami M.R., "Thermal buckling of functionally graded plates". *AIAA Journal*, 40(1): 162-169, (2002).
- [10] Reddy J.N., "Analysis of functionally graded plates". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 47(1- 3): 663-684, (2000).
- [11] Shen H.-S., "Functionally graded materials : nonlinear analysis of plates and shells", CRC Press, Boca Raton; New York, London, (2009).
- [12] Ross, P.J., "Taguchi Techniques for Quality Engineering", McGraw-Hill International Editions, 2nd Edition, New York, USA, (1996).
- [13] ANSYS Help, Version 13.
- [14] ANSYS Software (ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA) (www.ansys.com)
- [15] Minitab Software (Minitab Inc. State College, PA, USA) (www.minitab.com)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Rotational surfaces generated by cubic hermitian and cubic bezier curves

Kübik hermityen ve kübik bezier eğrileri tarafından oluşturulan dönel yüzeyler

Yazar(lar) (Author(s)): Hakan GÜNDÜZ¹, Ahmet KAZAN², H. Bayram KARADAĞ³

ORCID¹: 0000-0003-0645-5658

ORCID²: 0000-0002-1959-6102

ORCID³: 0000-0001-6474-877X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Gündüz H., Kazan A. and Karadağ H. B., "Rotational surfaces generated by cubic Hermitian and cubic bezier curves", *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1075-1082, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.542825

Kübik Hermityen ve Kübik Bezier Eğrileri Tarafından Oluşturulan Dönel Yüzeyler

Araştırma Makalesi / Research Article

Hakan GÜNDÜZ^{1*}, Ahmet KAZAN², H. Bayram KARADAĞ³

¹Faculty of Art and Science, Department of Mathematics, Inonu University, Turkey

²Doğuşehir Vahap Küçük Vocational School of Higher Education, Department of Computer Technologies, Malatya Turgut Özal University, Turkey

³Faculty of Art and Science, Department of Mathematics, Inonu University, Turkey

(Geliş/Received : 21.03.2019 ; Kabul/Accepted : 05.04.2019)

ÖZ

Dönel yüzeylerin şekillerinin ayarlanmasında geometrik tasarımın istenilen şekilde olması için, ilk olarak iki yerel şekil parametrelili kübik Hermityen ve kübik Bezier eğrileri kullanılarak dönel yüzeyler oluşturuldu. Oluşturulan bu yeni dönel yüzeylerin, yerel şekil parametrelerinin değiştirilmesi ile yüzeylerin şekillerinin ayarlanması konusunda iyi bir performansla sahip olduğu görüldü. Ayrıca, kübik Hermityen ve kübik Bezier eğrileri tarafından oluşturulan dönel yüzeyler, ilgi çekici yüzeylerin tasarımı için değerli bir yol sağlamaktadır. Bu bağlamda, bu dönel yüzeylerin ortalama ve Gauss eğrilikleri elde edilerek, bu yüzeyler için bazı karakterizasyonlar verildi.

Anahtar Kelimeler: Hermityen eğrileri, bezier eğrileri, dönel yüzeyler, şekil parametresi.

Rotational Surfaces Generated by Cubic Hermitian and Cubic Bezier Curves

ABSTRACT

To tackle the geometric design in adjusting shapes of rotation surfaces, firstly the rotation surfaces have been constructed by using cubic Hermitian and cubic Bezier curves with two local shape parameters. It has been seen that, the new rotational surfaces which have been constructed have a good performance on adjusting their shapes by changing the local shape parameters. Also, the rotational surfaces generated by cubic Hermitian and cubic Bezier curves have provided a valuable way for the design of interesting surfaces. In this context, some characterizations have been given for these rotational surfaces obtaining the mean and Gaussian curvatures of them.

Keywords: Hermitian curves, bezier curves, rotational surfaces, shape parameter.

1. INTRODUCTION

Geometry of curves plays an important role in industrial design and engineering as well as being an important branch of mathematics. In recent years, many authors such as G. Farin, J. Hoschek and A. Saxena have worked on the structure of curves for mathematical modelling [5,6,10]. The most important of these curves are the Hermitian curves, Ferguson curves, Bezier curves and etc. The De Casteljau algorithm has shown that, Bezier curves are written as linear combinations of Bernstein polynomials (for detail about these curves, see [6,9,10]).

Also, the geometry of surfaces such as, rotational surfaces, ruled surfaces, rational Bezier surfaces, rational B-spline surfaces, non-uniform rational B-spline surfaces, discrete surfaces and etc. have been studied by geometers and engineers widely in Euclidean space, Minkowski space, Galilean space, pseudo-Galilean space and etc [1,2,3,4,5,7,8].

For example, E. Octafiatiningsih and I. Sujarwo have used Quadratic Bezier curve on rotational and

symmetrical lampshade in [9]. So, by using this work we have constructed the present paper which is divided into three steps as follows:

- i. Recalling cubic Hermitian and cubic Bezier curves;
- ii. rotating cubic Hermitian curve and cubic Bezier curve about an axis to produce geometric surface designs;
- iii. giving some characterizations for these rotational surfaces obtaining the mean and Gaussian curvatures of them.

Consequently, the aim of this study is modelling some industrial objects by constructing and rotating cubic Hermitian and cubic Bezier curves and also giving new ideas for producers about object modelling industry.

2. PRELIMINARIES

A cubic Hermitian curve is a cubic polynomial curve segment constrained to a given position p and a tangent vector v at each endpoints.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : gunduz.haqan@hotmail.com

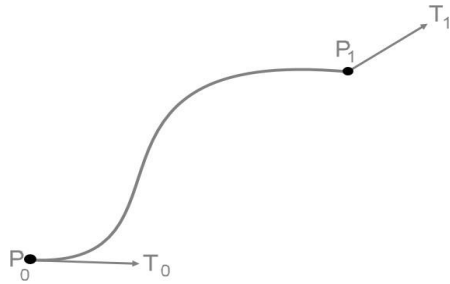


Figure 1. Cubic Hermitian curve created with two control points and two tangent segments

First, we'll recall the parametric expression of a cubic Hermitian curve [6,10].

A parametric cubic curve $P(u)$ in Euclidean 3-space is defined as $P(u) = (x(u), y(u), z(u))$, where

$$\begin{aligned} x(u) &= a_x + b_x u + c_x u^2 + d_x u^3, \\ y(u) &= a_y + b_y u + c_y u^2 + d_y u^3, \\ z(u) &= a_z + b_z u + c_z u^2 + d_z u^3, \end{aligned} \quad (1)$$

with parameters bounded in intervals $0 \leq u \leq 1$. Then, we can write it as

$$P(u) = (x(u), y(u), z(u)) = a + bu + cu^2 + du^3. \quad (2)$$

Then, for $u = 0$ and $u = 1$, we have

$$\begin{aligned} P(u = 0) &= a, \\ P(u = 1) &= a + b + c + d, \\ P'(u = 0) &= b, \\ P'(u = 1) &= b + 2c + 3d \end{aligned} \quad (3)$$

with a_x, b_x, c_x and d_x are algebraic scalar coefficients.

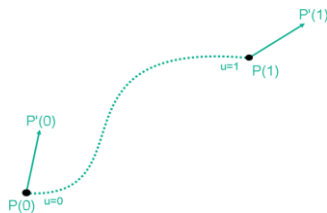


Figure 2. Control points and tangent segments of cubic Hermitian curve for $u = 0$ and $u = 1$

If the system (3) is solved, then the values of the vectors a, b, c and d are obtained by

$$\begin{aligned} a &= P(0), \\ b &= P'(0), \\ c &= -3P(0) + 3P(1) - 2P'(0) - P'(1), \\ d &= 2P(0) - 2P(1) + P'(0) + P'(1). \end{aligned} \quad (4)$$

If we use the equations (4) in (2), then the Hermitian curve is obtained as:

$$P(u) = P(0)H_1(u) + P(1)H_2(u) + P'(0)H_3(u) + P'(1)H_4(u), \quad (5)$$

where $H_1(u), H_2(u), H_3(u)$ and $H_4(u)$ are the base functions (or blending functions) of Hermitian curve given by

$$\begin{aligned} H_1(u) &= 1 - 3u^2 + 2u^3, \\ H_2(u) &= 3u^2 - 2u^3, \\ H_3(u) &= u - 2u^2 + u^3, \\ H_4(u) &= -u^2 + u^3 \end{aligned} \quad (6)$$

and $P(0), P(1), P'(0)$ and $P'(1)$ are geometric coefficients.

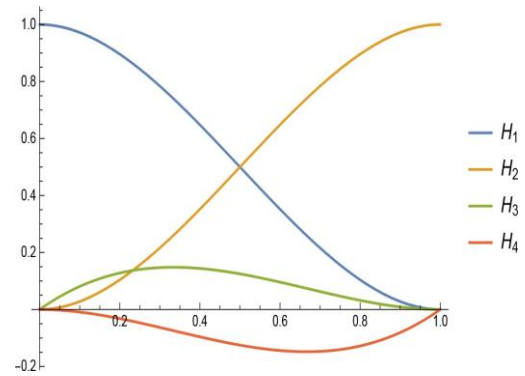


Figure 3. Hermitian blending functions

For the blending functions of Hermitian curve we have the following:

At $u = 0$ and $u = 1$, we get

$$\begin{aligned} H_1 = 1, H_2 = H_3 = H_4 = 0; P(0) = P_0, \\ H'_1 = H'_2 = H'_4 = 0, H'_3 = 1; P'(0) = T_0, \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} H_1 = H_3 = H_4 = 0, H_2 = 1; P(1) = P_1, \\ H'_1 = H'_2 = H'_3 = 0, H'_4 = 1; P'(1) = T_1, \end{aligned}$$

respectively. This gives us the endpoints and tangent vectors at endpoints by using blending functions.

Also, by putting the blending functions we can give the matrix form of cubic Hermitian curves as follows:

$$\begin{aligned} H &= [H_1(u), H_2(u), H_3(u), H_4(u)] \\ &= [u^3 \ u^2 \ u \ 1] \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = UM_H, \end{aligned} \quad (7)$$

where M_H is called the Hermitian characteristic matrix.

Collecting the Hermitian geometric coefficients into a geometric vector B , we have a matrix formulation for the Hermitian curve $P(u)$ as

$$P(u) = UM_H B, \quad (8)$$

where

$$B = \begin{bmatrix} P(0) \\ P(1) \\ P'(0) \\ P'(1) \end{bmatrix}.$$

M_H transforms geometric coordinates from the Hermitian bases to the algebraic coefficients of the monomial bases.

Next, let us recall some notations about the cubic Bezier curve [6,10].

n -th degree of Bezier curve is defined as $(n+1)$ control points' weighted linear combination using Bernstein polynomials. A Bezier curve can be expressed by

$$P(u) = \sum_{i=0}^n C_i^n (1-u)^{n-i} u^i P_i = \sum_{i=0}^n B_i^n(u) P_i, \quad 0 \leq u \leq 1,$$

where $B_i^n(u)$ is called Bernstein polynomials. More specifically, we can examine the behavior of Bezier curve for 3rd degree polynomials as follows:

Let $P(u)$ be the cubic Bezier curve lying on xz -plane. It has 4 control points P_i ($i = 0, 1, 2, 3$) and four base functions $f_i(u)$ ($i = 0, 1, 2, 3$) with parameters bounded in intervals $0 \leq u \leq 1$. Then we can write it as

$$P(u) = \sum_{i=0}^3 f_i(u) P_i = f_0(u) P_0 + f_1(u) P_1 + f_2(u) P_2 + f_3(u) P_3$$

with the base functions

$$\begin{aligned} f_0(u) &= 1 - 3u + 3u^2 - u^3, \\ f_1(u) &= 3u - 6u^2 + 3u^3, \\ f_2(u) &= 3u^2 - 3u^3, \\ f_3(u) &= u^3. \end{aligned} \quad (9)$$

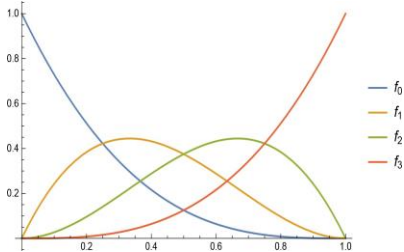


Figure 4. Cubic Bezier Base Functions

Also, according to the base functions, we can give the matrix form of cubic Bezier curve as follows:

$$\begin{aligned} B &= [f_1(u), f_2(u), f_3(u), f_4(u)] \\ &= [u^3 \quad u^2 \quad u \quad 1] \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = U M_B, \end{aligned} \quad (10)$$

where M_B is called the Bezier matrix.

Collecting the Bezier geometric coefficients into a geometric vector G which is defined by the user, is an array of data points. Here, we have a matrix formulation for the Bezier curve $P(u)$ as

$$P(u) = U M_B G, \quad (11)$$

where

$$G = \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}.$$

Note that the curve does not pass through the points P_1 and P_2 . In cubic Bezier segments, in order to change the curve's shape we may relocate any of control points P_0, P_1, P_2 or P_3 . We also know that, for Hermitian

segments, we have to specify end slopes for a particular shape and this situation is difficult for researchers. Furthermore, Bezier curve is easier to specify the shape of control polyline than Hermitian curve.

For more details about Hermitian and Bezier curves, we refer to [6,9,10].

Now, let us investigate the rotational surfaces according to the axes of rotation in E^3 .

Rotation is the change of an object coordinates into the new position by moving the whole coordinate points defined in the initial form with an angle about an axis of rotation. The coordinate system E^3 has three rotation axes. First suppose that the axis of rotation is the z -axis.

Let A be a 3×3 regular matrix and $0 \neq \xi \in E^3$ be a vector. If A satisfies the following conditions, then it is said that A denotes a rotation in positive direction

- i. $A\xi = \xi$,
- ii. $AIA^t = I$,
- iii. $\det A = 1$,

where I is the 3×3 unit matrix.

From this definition, it can be seen that the rotation matrix which fixes the z -axis is the set of 3×3 matrices defined by

$$A(v) = \begin{bmatrix} \cos v & -\sin v & 0 \\ \sin v & \cos v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad v \in \mathbb{R}$$

Then, by rotating the curve

$\alpha(u) = (\alpha_1(u), \alpha_2(u), \alpha_3(u))$ about the z -axis, the rotational surface M can be parametrized by

$$\begin{aligned} \Psi(u, v) &= (\alpha_1(u) \cos v - \alpha_2(u) \sin v, \alpha_1(u) \sin v \\ &\quad + \alpha_2(u) \cos v, \alpha_3(u)). \end{aligned} \quad (12)$$

By rotating the curve α about the x -axis and y -axis, one can write the rotational surfaces similarly.

3. CONSTRUCTION OF ROTATIONAL SURFACES GENERATED BY CUBIC HERMITIAN CURVE

In this section, we'll construct the rotational surface generated by cubic Hermitian curve by using the structure of a tube deformation.

Suppose given a tube of radius r , where $r \in [a, b]$, i.e. the minimum radius of the tube is a and the maximum of the radius is b . Also, let we define the height of the tube as h , where $h \in [c, d]$, i.e. the minimum height of the tube is c while the maximum of the radius is d . The selection of the value of r and h in the interval aims to differences in size of shape components of geometric design.

Firstly, we determine a center point on the tube base circle $(x_1, y_1, z_1) = (0, 0, 0)$. Then, for this center point and $v = 0$ the tube base circle using the circle equation is built and the point $P(0)$ is given by

$$(x_1 + r_1 \cos v, y_1 + r_1 \sin v, z_1) = (r_1, 0, 0). \quad (13)$$

Also, let the center point on the tube roof circle be $(x_1, y_1, z_1) = (0, 0, h)$. Then, for $v = 0$, we can build tube roof circle using the circle equation and obtain the point, namely $P(1)$ as

$$(x_1 + r_2 \cos v, y_1 + r_2 \sin v, z_1) = (r_2, 0, h). \quad (14)$$

Then, for controlling the curvatures of the Hermitian curve, we can determine the control points $P'(0)$ and $P'(1)$ as follows:

$$P'(0) = (x, 0, 0) \quad (15)$$

and

$$P'(1) = (x, 0, z), \quad (16)$$

where $-2r \leq x, z \leq 2h$ and $x, z \in \mathbb{R}$.

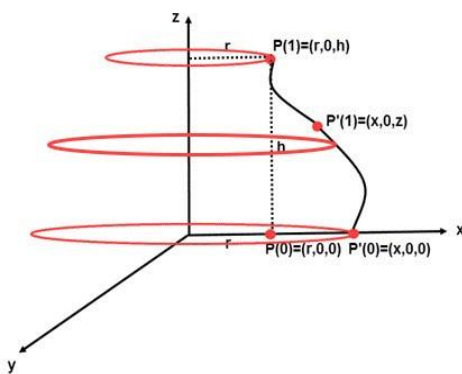


Figure 5. Representation of a tube deformation for Hermitian curve

Further by using (13)-(16) in the equation $P(u) = P(0)H_1(u) + P(1)H_2(u) + P'(0)H_3(u) + P'(1)H_4(u)$, the Hermitian curve is obtained by

$$P(u) = (r_1 H_1(u) + r_2 H_2(u) + x H_3(u) + x H_4(u), 0, h H_2(u) + z H_4(u)), \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (17)$$

with the blending functions (6).

3.1. Some Characterizations of Rotational Surfaces Generated By Cubic Hermitian Curve

In this subsection, firstly we'll give some examples for rotational surface generated by cubic Hermitian curve by obtaining the parametric expression of it. Also, we'll give some characterizations for it with the aid of the mean and Gaussian curvatures.

By rotating the Hermitian curve (17) around z-axis, we get the rotational surface as

$$P(u, v) = ([r_1(1 - 3u^2 + 2u^3) + r_2(3u^2 - 2u^3) + x(u - 3u^2 + 2u^3)] \cos v, [r_1(1 - 3u^2 + 2u^3) + r_2(3u^2 - 2u^3) + x(u - 3u^2 + 2u^3)] \sin v, h(3u^2 - 2u^3) + z(-u^2 + u^3)). \quad (18)$$

In the following figures, one can see the rotational surface (18) for $x = 100, h = 15, z = 150$ and different radius r_1 and r_2 :

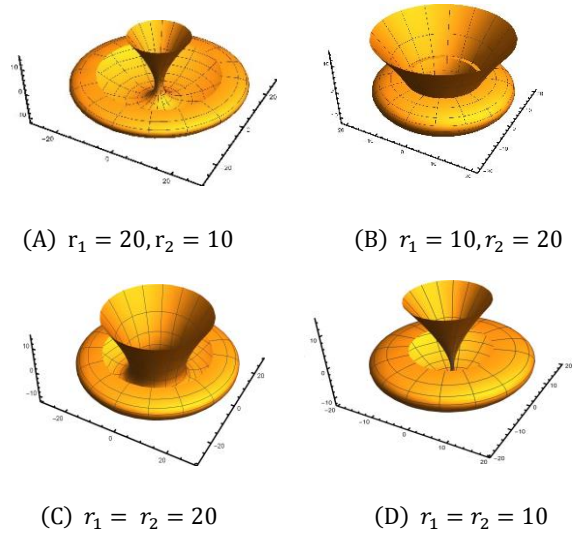


Figure 6. Rotational surface (18) for different radius

Now, by taking $r_1 = r_2 = r$ in (18), we can write the rotational surface generated by cubic Hermitian curve as

$$P(u, v) = ([r + x(u - 3u^2 + 2u^3)] \cos v, [r + x(u - 3u^2 + 2u^3)] \sin v, h(3u^2 - 2u^3) + z(-u^2 + u^3)). \quad (19)$$

In the following figures, one can see the Hermitian curve and rotational surface (19) generated by this cubic Hermitian curve for $r = 10, x = 300, h = 15, z = 400$:

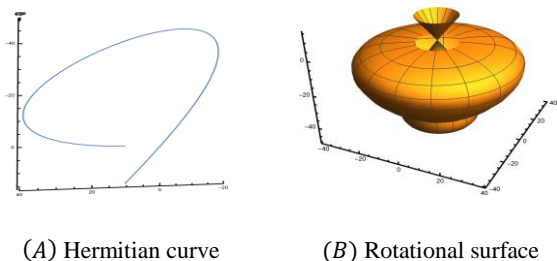


Figure 7. Hermitian curve and rotational surface (19)

The coefficients of the first and second fundamental forms of the rotational surface (19) are obtained as

$$E = x^2(1 - 6u + 6u^2)^2 + [6hu(1 - u) + zu(-2 + 3u)]^2, \quad F = 0, \quad (20)$$

$$G = [r + x(u - 3u^2 + 2u^3)]^2$$

and

$$L = \frac{2x}{\sqrt{D}} [3h(1 - 2u) - z(1 - 3u + 3u^2)], \quad M = 0, \quad (21)$$

$$N = \frac{1}{\sqrt{D}} [r + x(u - 3u^2 + 2u^3)] \times [6hu(1 - u) + zu(-2 + 3u)],$$

respectively. Here, the unit normal of the surface is

$$N(u, v) = \frac{1}{\sqrt{D}} (-[6hu(1-u) + zu(-2+3u)] \cos v, \\ -[6hu(1-u) + zu(-2+3u)] \sin v, \\ x(1-6u+6u^2))$$

and

$$D = [6hu(1-u) + zu(-2+3u)]^2 \\ + x^2(1-6u+6u^2)^2.$$

So, we can give the following Theorem:

Theorem 1. *The mean curvature and Gaussian curvature of the rotational surface (19) are*

$$H = \frac{2x[r + x(u - 3u^2 + 2u^3)] \times \\ [3h(1-2u) - z(1-3u+3u^2)] + \\ [x^2(1-6u+6u^2)^2 + [6hu(1-u) + zu(-2+3u)]^2] \times \\ [6hu(1-u) + zu(-2+3u)]}{2[x^2(1-6u+6u^2)^2 + [6hu(1-u) + zu(-2+3u)]^2]^{\frac{3}{2}} \times \\ [r + x(u - 3u^2 + 2u^3)]} \quad (22)$$

$$K = \frac{2x[3h(1-2u) - z(1-3u+3u^2)] \times \\ [6hu(1-u) + zu(-2+3u)]}{[x^2(1-6u+6u^2)^2 + [6hu(1-u) + zu(-2+3u)]^2]^2 \times \\ [r + x(u - 3u^2 + 2u^3)]} \quad (23)$$

respectively.

The following figures show the Gaussian and mean curvatures functions' graphics of the rotational surface (19) for $r = 10, x = 300, h = 15, z = 400$ and the variations of Gaussian and mean curvatures on this surface:

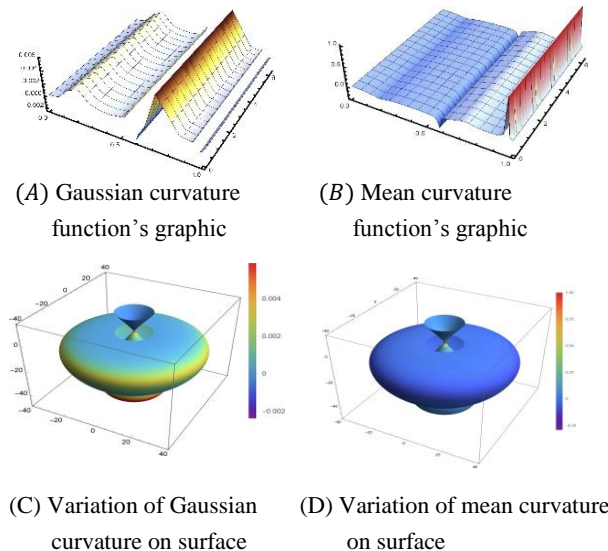


Figure 8. Gaussian and mean curvatures' graphics and the variations of Gaussian and mean curvatures on surface

Now, let us take $z = 2h$ in the equations (19)-(23). Then, we have

$$P(u, v) = ([r + x(u - 3u^2 + 2u^3)] \cos v, \\ [r + x(u - 3u^2 + 2u^3)] \sin v, hu^2). \quad (24)$$

In the following figures, one can see the Hermitian curve and rotational surface (24) generated by this cubic Hermitian curve for $r = 1, x = 20, h = 5, z = 10$:

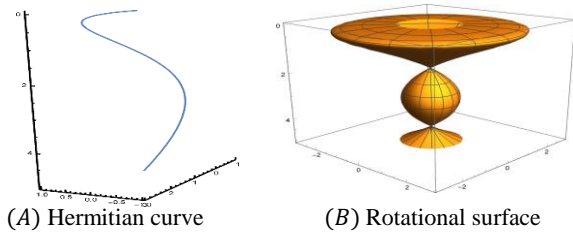


Figure 9. Hermitian curve and rotational surface (24)

Also, for (24)

$$E = x^2(1-6u+6u^2)^2 + 4h^2u^2, \quad F = 0, \\ G = [r + x(u - 3u^2 + 2u^3)]^2 \quad (25)$$

and

$$L = \frac{2hx}{\sqrt{D}}(1-6u^2), \quad M = 0, \\ N = \frac{2hu}{\sqrt{D}}[r + x(u - 3u^2 + 2u^3)]. \quad (26)$$

Theorem 2. *The mean curvature and Gaussian curvature of the rotational surface (24) are*

$$H = \frac{h\{x(1-6u^2)[r + x(u - 3u^2 + 2u^3)]\} + \\ hu[x^2(1-6u+6u^2)^2 + 4h^2u^2]}{[x^2(1-6u+6u^2)^2 + 4h^2u^2]^{\frac{3}{2}}[r + x(u - 3u^2 + 2u^3)]} \quad (27)$$

and

$$K = \frac{4h^2xu(1-6u^2)}{[x^2(1-6u+6u^2)^2 + 4h^2u^2]^2[r + x(u - 3u^2 + 2u^3)]} \quad (28)$$

respectively.

The following figures show the Gaussian and mean curvatures functions' graphics of the rotational surface (24) for $r = 1, x = 20, h = 5, z = 10$ and the variations of Gaussian and mean curvatures on this surface:

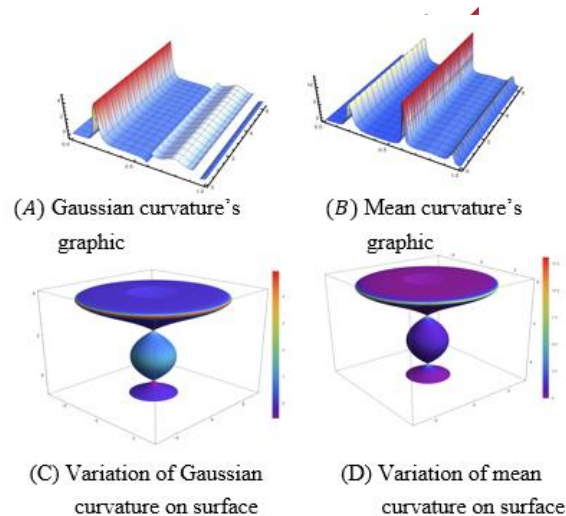


Figure 10. Gaussian and mean curvatures' graphics and the variations of Gaussian and mean curvatures on surface

Now, from (27) and (28) we can give the following characterizations:

Corollary 1. Let M be the rotational surface (24) which is generated by cubic Hermite curve.

- i. Then, the mean curvature of surface cannot vanish at the initial point of the Hermite curve.
- ii. Then, the mean curvature of surface vanishes at the ending point of the Hermite curve if and only if the equation $5hrx = x^2 + 4h^2$ holds.
- iii. If the mean curvature of surface vanishes at the ending point of the Hermite curve, then the control point of $P'(1)$ cannot be on the z -axis or the control point of $P'(0)$ cannot be on the origin.

Corollary 2. Let M be the rotational surface (24) which is generated by cubic Hermite curve. Then, the Gaussian curvature of surface

- i. vanishes at the initial point of the Hermite curve;
- ii. vanishes on the parametric curve $P(\frac{1}{\sqrt{6}}, v)$ of M ;
- iii. vanishes, if the control point of $P'(1)$ is on the z -axis or the control point of $P'(0)$ is on the origin.

4. CONSTRUCTION OF ROTATIONAL SURFACES GENERATED BY CUBIC BEZIER CURVE

In this section, we'll construct the rotational surface generated by cubic Bezier curve by using the structure of a tube deformation.

Suppose given a tube of radius r_1 and r_2 , where $r_1, r_2 \in [a, b]$. Also, let we define the height of the tube as h , where $h \in [c, d]$. The selection of the value of r_1, r_2 and h in the interval aims to differences in size of shape components of geometric design.

Firstly, we determine a center (initial) point on the tube base circle $(x_1, y_1, z_1) = (0, 0, 0)$. Then, for this center (initial) point and $v = 0$ the tube base circle using the circle equation is built and the point P_0 is given by

$$P_0 = (x_1 + r_1 \cos v, y_1 + r_1 \sin v, z_1) = (r_1, 0, 0). \quad (29)$$

Also, let the center (ending) point on the tube roof circle be $(x_1, y_1, z_1) = (0, 0, h)$. Then, for $v = 0$, we can build tube roof circle using the circle equation and obtain the point, namely P_3 as

$$P_3 = (x_1 + r_2 \cos v, y_1 + r_2 \sin v, z_1) = (r_2, 0, h). \quad (30)$$

Then, the other two control points P_1 and P_2 of the cubic Bezier curve can be defined as follows:

$$P_1 = (x_1, 0, z_1) \quad (31)$$

and

$$P_2 = (x_2, 0, z_2). \quad (32)$$

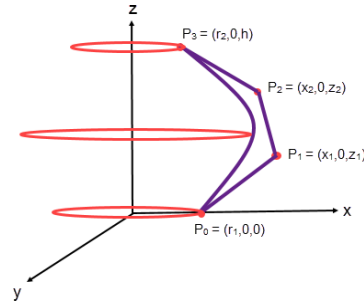


Figure 11. Representation of a tube deformation for Bezier curve

Further by using (29)-(32) in the equation

$$P(u) = f_0(u)P_0 + f_1(u)P_1 + f_2(u)P_2 + f_3(u)P_3,$$

the Bezier curve is obtained by

$$P(u) = (r_1 f_0(u) + x_1 f_1(u) + x_2 f_2(u) + r_2 f_3(u), 0, z_1 f_1(u) + z_2 f_2(u) + h f_3(u)), 0 \leq u \leq 1 \quad (33)$$

with the base functions (9).

4.1. Some Characterizations of Rotational Surfaces Generated By Cubic Bezier Curve

In this subsection, firstly we'll give some examples for rotational surface generated by cubic Bezier curve by obtaining the parametric expression of it. Also, we'll give some characterizations for it with the aid of the mean and Gaussian curvatures.

By rotating the Bezier curve (33) around z -axis, we get the rotational surface $P(u, v)$ with two local shape parameters as

$$\begin{aligned} & [(r_1(1 - 3u + 3u^2 - u^3) + x_1(3u - 6u^2 + 3u^3) \\ & \quad + x_2(3u^2 - 3u^3) + r_2 u^3] \cos v, \\ & [r_1(1 - 3u + 3u^2 - u^3) + x_1(3u - 6u^2 + 3u^3) \\ & \quad + x_2(3u^2 - 3u^3) + r_2 u^3] \sin v, \\ & z_1(3u - 6u^2 + 3u^3) + z_2(3u^2 - 3u^3) + u^3 h. \end{aligned} \quad (34)$$

In the Figure 12, one can see the rotational surface (34) for different values of $r_1, r_2, x_1, x_2, z_1, z_2$ and h which have been chosen as following, respectively:

- (A) $r_1 = 2, r_2 = 0, x_1 = 5, x_2 = 10, z_1 = 10, z_2 = 2$ and $h = 0.1$;
- (B) $r_1 = 1, r_2 = 2, x_1 = 10, x_2 = 5, z_1 = 25, z_2 = 10$ and $h = 1$;
- (C) $r_1 = 1, r_2 = 2, x_1 = 20, x_2 = 5, z_1 = 20, z_2 = 5$ and $h = 20$;
- (D) $r_1 = 1, r_2 = 2, x_1 = 50, x_2 = 35, z_1 = 40, z_2 = 25$ and $h = 90$.

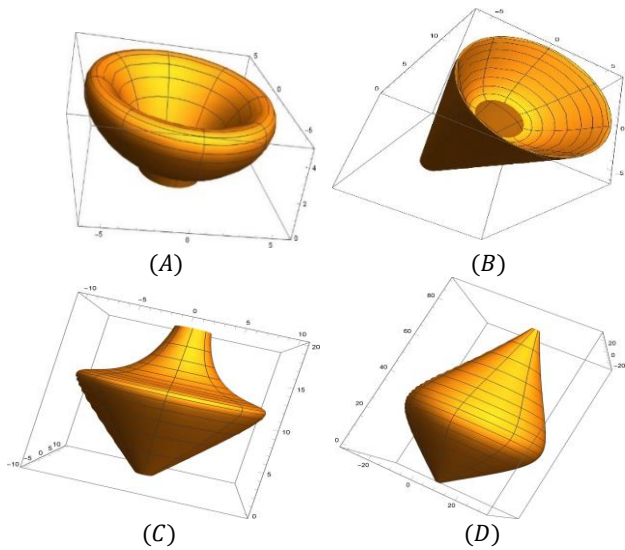


Figure 12. Rotational surface (34) for different values of $r_1, r_2, x_1, x_2, z_1, z_2$ and h

The first derivative of the surface (34) with respect to u and v are

$$P_u(u, v) = ([r_1(-3 + 6u - 3u^2) + x_1(3 - 12u + 9u^2) + x_2(6u - 9u^2) + 3u^2r_2] \cos v, [r_1(-3 + 6u - 3u^2) + x_1(3 - 12u + 9u^2) + x_2(6u - 9u^2) + 3u^2r_2] \sin v, z_1(3 - 12u + 9u^2) + z_2(6u - 9u^2) + 3u^2h)$$

$$P_v(u, v) = (-\rho \sin v, \rho \cos v, 0)$$

where $\rho = r_1(1 - 3u + 3u^2 - u^3) + x_1(3u - 6u^2 + 3u^3) + x_2(3u^2 - 3u^3) + r_2u^3$, $0 \leq u \leq 1$. So the coefficients of first fundamental form of rotational surface (34) are obtained as

$$\begin{aligned} E &= \beta^2 + \theta^2, \\ F &= 0, \\ G &= \rho^2, \end{aligned} \quad (35)$$

where

$$\beta = r_1(-3 + 6u - 3u^2) + x_1(3 - 12u + 9u^2) + x_2(6u - 9u^2) + 3u^2r_2,$$

$$\theta = z_1(3 - 12u + 9u^2) + z_2(6u - 9u^2) + 3u^2h.$$

Also, the unit normal of the surface can be found as

$$N(u, v) = \frac{1}{\sqrt{\theta^2 + \beta^2}}(-\theta \cos v, -\theta \sin v, \beta).$$

The second derivatives of $P(u, v)$ are given by

$$P_{uu}(u, v) = ([r_1(6 - 6u) + x_1(-12 + 18u) + x_2(6 - 18u) + 6ur_2] \cos v,$$

$$[r_1(6 - 6u) + x_1(-12 + 18u) + x_2(6 - 18u) + 6ur_2] \sin v,$$

$$z_1(-12 + 18u) + z_2(6 - 18u) + 6uh),$$

$$P_{uv}(u, v) = (-\beta \sin v, \beta \cos v, 0),$$

$$P_{vv}(u, v) = (-\rho \cos v, -\rho \sin v, 0).$$

Then, the coefficients of second fundamental form of rotational surface are obtained by

$$L = \frac{-\sigma\theta + \mu\beta}{\sqrt{\theta^2 + \beta^2}},$$

$$M = 0, \quad (36)$$

$$N = \frac{\rho\theta}{\sqrt{\theta^2 + \beta^2}},$$

respectively. Here,

$$\sigma = r_1(6 - 6u) + x_1(-12 + 18u) + x_2(6 - 18u) + 6ur_2$$

and

$$\mu = z_1(-12 + 18u) + z_2(6 - 18u) + 6uh.$$

We have the following theorem.

Theorem 3. The mean curvature and Gaussian curvature of the rotational surface (34) are

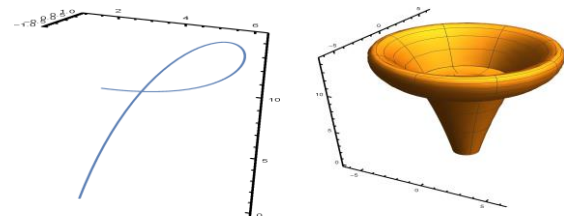
$$H = \frac{\theta(\beta^2 + \theta^2) + \rho(\mu\beta - \sigma\theta)}{2\rho(\beta^2 + \theta^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (37)$$

and

$$K = \frac{\theta(\mu\beta - \sigma\theta)}{\rho(\beta^2 + \theta^2)^2}, \quad (38)$$

respectively.

In the following figures, one can see the cubic Bezier curve and rotational surface (34) generated by this cubic Bezier curve for $r_1 = 1, r_2 = 2, x_1 = 5, x_2 = 10, z_1 = 25, z_2 = 10, h = 10$:

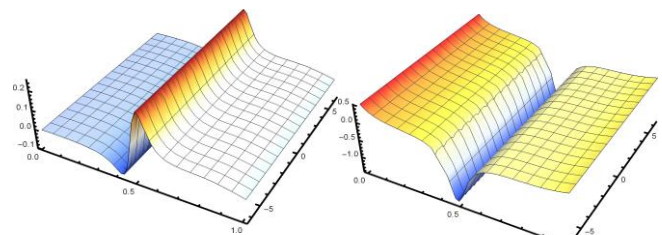


(A) Bezier curve

(B) Rotational surface (34)

Figure 13. Bezier curve and rotational surface (34)

The following figures show the Gaussian and mean curvatures functions' graphics of the rotational surface (34) and the variations of Gaussian and mean curvatures on this surface:



(A) Gaussian curvature function's graphic

(B) Mean curvature function's graphic

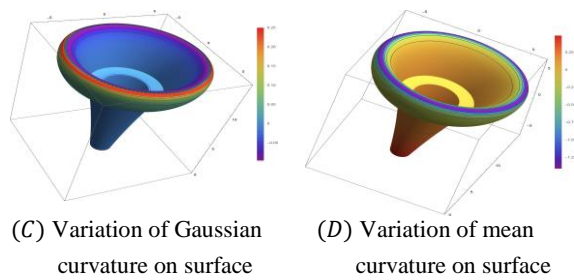


Figure 14. Gaussian and mean curvatures' graphics and the variations of Gaussian and mean curvatures on surface

Now, from (37) and (38), let us give some characterizations for rotational surface (34) generated by cubic Bezier curve.

Corollary 3. *Let M be the rotational surface (34) which is generated by cubic Bezier curve.*

- i. *If the control point of P_1 is on the x -axis, then the mean curvature of the surface cannot vanish at the initial point of the Bezier curve.*
- ii. *If the control point of P_1 is on the origin, then the mean curvature of the surface cannot vanish at the initial point of the Bezier curve.*
- iii. *If the control point of P_1 is on the x -axis, then the Gaussian curvature of the surface vanishes at the initial point of the Bezier curve.*
- iv. *If the control point of P_2 is on the origin, then the Gaussian curvature of the surface cannot vanish at the initial point of the Bezier curve.*
- v. *If the control points of P_2 and P_3 are on the x -axis, then the mean curvature of the surface cannot vanish at the ending point of the Bezier curve.*
- vi. *If the control points of P_2 and P_3 are on the x -axis, then the Gaussian curvature of the surface vanishes at the ending point of the Bezier curve.*
- vii. *If the control point of P_2 is on the origin and the equation $x_1h = z_1r_2$, then the Gaussian curvature of the surface vanishes at the ending point of the Bezier curve.*

5. CONCLUSION

In the present study, we have used Hermitian and Bezier curves in the cubic structure and applied a rotation to these curves. Based on these curves, we have obtained geometric shapes as the result of rotating surfaces. Industrial objects such as lampshades, vases, bullets, etc. provide less costly, more convenient and more reliable results through the use of these structures. In this context, by changing the values of constants $r_1, r_2, x_1, x_2, z_1, z_2$ and h , different curves and rotational surfaces generated by these curves can be obtained. In the geometric sense, some characterizations which have been obtained with

the aid of mean and Gaussian curvatures of the rotational surfaces generated by these curves have been examined.

The benefits of this study for industrial design are:

1. With the help of computer, some new procedure for modelling some industrial objects can be obtained.
2. New ideas for producers about some object models industry in the form of geometric surface design so as to increase the choice of existing models previously can be provided.

Furthermore, by defining the cubic Hermitian and cubic Bezier curves in different spaces, such as Lorentz-Minkowski space, Galilean space and pseudo Galilean space, these curves and rotational surfaces can be investigated as a future work.

REFERENCES

- [1] Arslan K., Bulca B. and Kosova D., "On Generalized Rotational Surfaces in Euclidean Spaces", *J. Korean Math. Soc.*, (2017).
- [2] Baikoussis C. and Blair D.E., "On the Gauss map of ruled surfaces", *Glasgow Math. J.*, 34: 355-359, (1992).
- [3] Bobenko A. and Pinkall U., "Discrete isothermic Surfaces", *J. reine angew. Math.*, 475: 187-208, (1996).
- [4] Chen B.Y., Choi M. and Kim Y.H., "Surfaces of revolution with pointwise 1-type Gauss map", *J. Korean Math. Soc.*, 42(3): 447-455, (2005).
- [5] Dietz R., Hoschek J. and Juettler B., "An algebraic approach to curves and surfaces on the sphere and on other quadrics", *Computer Aided Geometric Design*, 10: 211-229, (1993).
- [6] Farin G., "Curves and Surfaces for CAGD: A Practical Guide", *Academic Press Inc*, San Diego (2002).
- [7] Kazan A. and Karadağ H. B., "A classification of Surfaces of Revolution in Lorentz-Minkowski Space", *Int. J. Contemp. Math. Sciences*, 6(39): 1915-1928, (2011).
- [8] Kazan A. and Karadağ H. B., "Weighted Minimal and Weighted Flat Surfaces of Revolution in Galilean 3-Space with Density", *Int. J. of Analysis and Applications*, 16(3): 414-426, (2018).
- [9] Octafiatiningsih E. and Sujarwo I., "The Application of Quadratic Bezier Curve on Rotational and Symmetrical Lampshade", *Cauchy-Journal of Pure and Applied Mathematics*, 4(2): 100-106, (2016).
- [10] Saxena A. Saxena Sahay B., "Computer Aided Engineering Design", *Anamaya Publishers*, New Delhi, India, (2005).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Implementation of a real time analog secure image communication system via a chaotic circuit

Kaotik devre ile gerçek zamanlı analog güvenli görüntü iletişim sisteminin uygulanması

Yazar(lar) (Author(s)): Aybaba HANCERLİOGULLARI¹, Khaled Mohamed EL HADAD², Erol KURT³

ORCID¹: 0000-0001-7008-480X

ORCID²: 0000-0002-0374-4350

ORCID³: 0000-0002-3615-6926

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Hancerliogulları A., El Hadad K.M. and Kurt E., "Implementation of a real time analog secure image communication system via a chaotic circuit", *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1083-1092, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.557289

Kaotik Devre ile Gerçek Zamanlı Analog Güvenli Görüntü İletişim Sisteminin Uygulanması

Araştırma Makalesi / Research Article

Aybaba HANCERLİOGULLARI¹, Khaled Mohamed EL HADAD², Erol KURT^{3*}

¹Faculty of Arts and Sciences Physics Department, Kastamonu University, Turkey

²Department of Electronics, College of Engineering, Elmergib University, 40414 Libya

³Technology Faculty Electric-Electronics Engineering Department, Gazi University, Turkey

(Geliş/Received 23.04.2019 ; Kabul/Accepted 27.05.2019)

ÖZ

Eşzamanlı bir kaotik devreyi temel alarak yeni bir güvenli görüntü haberleşme sistemi tasarlanıp uygulanmaktadır. Yazarlardan biri tarafından yakın zamanda önerilen yeni kaotik devre direnç, bobin ve diyot çiftinden (yani R2L2D) müteşekkildir. Eşzamanlılık birimi hakim - esir düzenlenimi ile çalışmaktadır. Gerçek zamanlı haberleşmeyi sağlamak için, analog bir hakim devre ilkin sayıların kaotik dizilerini oluşturmak için uygulanmıştır. Sonrasında; bu analog araç bir bilgisayara bir analog / sayısal dönüştürücü yardımıyla iletilmekte ve gizli görüntü elde edilmektedir. Ayrıca; esir devre görüntünün gri seviyelerinin çıkarılması işlemi için bu kaotik dizilerin bir kopyasını almaktadır. Sayısal kaotik görüntü etkin bir yöntemle sayısal / analog dönüştürücü yardımıyla esir devreye iletilmekte ve şifresi çözülmüş olan görüntü gerçek zamanlı olarak elde edilmektedir. Bu tekniğin geleneksel olanlara göre üstünlüğü, gri renkli görüntüleri alıcıya gönderirken bile gerçek zamanlı olmasından dolayı sayısal verinin kaydedilmiş bir kopyasını gerektirmemesidir. Geleneksel teknikler depolanmış ve işlenmiş verileri kullanır ve bu süreç, günümüzün gelişmiş ağ ortamında güvenlik sorunlarına sebep olur. Böylece; şifrelenmiş bir görüntüyü gerçek zamanlı bir cihazda analog bir kaotik sistem kullanarak göndermek belli bir güvenlik üstünlüğüne sahiptir. Şifresi çözülmüş görüntülerle yapılan ilk analizler sürecin zamanla verimli ve güvenli olduğunu kanıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Güvenli iletişim, analog, kaotik devre, görüntü şifreleme, şifre çözme.

Implementation of a Real Time Analog Secure Image Communication System via a Chaotic Circuit

ABSTRACT

A new secure image communication system has been designed and implemented based on a synchronized chaotic circuit. The new chaotic circuit, which has recently proposed by one of the authors contains a resistor, two inductors, and two diodes (i.e. R2L2D). The synchronization part operates with a master – slave configuration. In order to achieve the real-time communication, initially the analog master circuit has been implemented to generate chaotic sequences of numbers. Then, that analog tool has been transmitted to a computer via an analog/digital converter and a hidden image has been obtained. Besides, the slave circuit has also received a copy of that chaotic sequences in order to use it in subtraction process of image gray levels. The digital chaotic image has been transmitted to the slave circuit via a digital/analog converter with an efficient method and the decrypted image has been obtained in real-time. The advantage of that technique over the conversional ones is that it does not require any saved copy of the digital data, even for sending them in gray images to the receiver, since it is real-time. The conventional techniques use the stored and processed data and that can cause security problems in today's advanced web media. Thus to send the encrypted image in a real-time device by using an analog chaotic equipment has certain security superiority. The analyses on the preliminary decrypted images proves that the process is efficient in time and secure.

Keywords: Secure communication, analog, chaotic circuit, image encryption, decryption

1. INTRODUCTION

The researchers have shown great interest on the nonlinear and chaotic circuits due to their broad application areas such as synchronization, noise characterization, optical beam production, Josephson junctions, etc. Indeed, studying on a nonlinear system and chaotic electrical circuits is the most economical and easy way [1-4]. On the one hand, these circuits can be defined by simple coupled differential equations.

According to literature, the simplest circuit can be mentioned as resistor – inductor – diode circuit (RLD), which leads to a sequence of many period-doublings, thus it has been used to explore the universality of “chaos” in that context [5, 6]. When a resistor, diode and an inductor are joined in series, chaos occurs due to the nonlinear charge - voltage behavior of the diode[5]. Furthermore, using the invariants characterizing attractors as parameters for inputs, make it possible to get single-step and multiple-step predictions of chaotic time-series, which controls RLD circuits [7]. In other applications, for instance, Chua's diode and non-autonomous Chua's diode [6] there exists nonlinear

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ekurt@gazi.edu.tr

resistors, which ensure the complexity. When Chua's circuit was first invented in early 1980's, it was concerned by many researchers on the generation of True Random Number Generators (TRNG) for the cryptographic maneuvers [6]. Considering the artificial TRNG with many advantages, randomness take place through an unpredictable natural process in the hardware. Random Number These generators provide sequential and statistically independent random numbers [8]. Apart from the studies above, many other circuits have also been proposed for different applications, but discussion over all those circuits is a comprehensive task and out of the consideration of present paper. Chaotic synchronization has recently gained more concern as area of research in secure communication. Some chaotic synchronizing and relevant factors are discussed by Feki [9]. However, two identical chaotic system synchronization was initially reported in 1990s [10]. Electrical engineers realized that the generated chaos can be a possible source of communication system security, because chaos is extremely sensitive to the initial conditions and parameters [11]. Secure communication using synchronization between chaotic systems was a newly found method of communication security. This "hardware key" secures communication that rapidly takes place. The "hardware key" was a new concept but engineers and scientists soon realized its importance for secure communication systems. There was a great scope of encryption through chaos; therefore, large number of researchers conducted researches on it. Electrical engineers of that time felt that it could help creating communication security because of its unique parameters. Later this type of chaotic hardware key was acknowledged as useful by researchers, engineers and experts all over the world [12]. Significant potentials of "hardware key" led to vast and multiple researches in the field of communication security that further opened new avenues for progress in this field. Many image encryption schemes based on chaos theory have been presented in literature. In 1992, Bourbakis and Alexopoulos [13] proposed an image encryption scheme utilizing SCAN language for encryption and compression of an image. During recent years, many logistic map algorithms were studied. The usage of digital chaotic systems instead of analog chaotic systems have also been proposed. Algorithms convert pixels into chaotic maps to make chaotic map lattice. This encryption is reprocessed using secret system parameters. Pisarchik and Zanin [14], Xiangdong, Junxing [15] have presented another algorithm using chaos theory and sorted transformations. Hu and Han [16] used pixel-based scrambling for digital medical images protection. Tong and Cui [17] introduced image encryption using dynamic cipher shifting. Pisarchik and Zanin [14] dynamically shifted compound chaotic cipher sequence. They moved all the pixels through 2D chaotic map using substitution and permutation, which moved new pixels as a permutation of the original ones. In the substitution process, the pixel values are altered sequentially by Fridrich [18], Gao,

Zhang [19]. The chaotic algorithm with its power and tangent functions used a chaotic sequence generated by XOR operation [20]. Zhou, Wong [21] have proposed parallel image encryption algorithm using discretized Kolmogorov flow map, which first permutes a chaotic map and encrypts it in the cipher block chain mode. Communication security using encryption works by converting the data to an incomprehensible (not understandable) format with the help of a transmitter. The transmitter makes the data invisible and quite unreadable during the communication/transmission processes. This encryption is transmitted using any insecure link. On the recipient side, encrypted data is reconverted into comprehensible format and thus the information is transmitted securely. There are various methods for data hiding such as the *spatial domain*, *frequency domain* and *compressed data domain*. Among them, direct methods have certain advantages in the sense that they use all the image-based data and provide very accurate registration [22]. It has a disadvantage as well and that is their memory requirement, and besides, close initialization and techniques may not be easy to implement. In order to prove robust chaos encryption system, there are many tests to check. Histogram results and correlation values have shown that encryption of images can be unpredictable [23]. However, all those studies have come out a security issue that one can reach the digital data easier via internet and hardware or analog circuit-based solutions can serve better solutions, when they are used in real-time basis in order to prevent that online insecurity. In a recent study [24], Kurt and Bingol has proposed a new circuit, namely R2L2D circuit. A wide feeding amplitude and frequency regimes have been explored in this circuit. A new sweep up/down effect has also been discovered by them and that effect governs the identification of the dynamics in terms of periodic and chaotic regimes in this circuit for sweeping parameters [9, 24]. In the present paper, this new R2L2D circuit is applied to a real-time secure image communication application. Since this hardware and real-time based operation is secure than the software and digital stored systems, that new approach offers a good image security method in that field.

2. BACKGROUND ON SYNCHRONIZATION AND SECURE COMMUNICATION

The R2L2D circuit has been explored for its amplitude and frequency regimes [24] because of its sweep up/down behavior. In that manner, the periodic and chaotic regimes may invade each other for different frequencies. Thus, it defines an uncertainty region for the thresholds of the dynamic regimes depending on the feeding voltages. That effect has an importance for the synchronization and encryption studies since the feeding voltages affect the regime. To be at the safe side, one should study on a chaotic region in the map given in thresholds of the dynamic regimes depending on the

feeding voltages. That effect has an importance for the synchronization and encryption studies since the feeding voltages affect the regime. To be at the safe side, one should study on a chaotic region in the map given in Ref.[25]. Strictly speaking, the synchronization of R2L2D can be studied for a wider parameter region in R2L2D circuit compared to the ordinary RLD circuit. It is also obvious from Refs. [24, 25] that the best synchronization performance can be obtained for lower frequencies and amplitudes. According to experiments, the chaotic regimes also affect the recovery of a masked signal as proven in Ref.[26].The determination of synchronization is defined via the Master circuit as follows. The system equations of the Master function (m) are formed as,

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t)) \tag{1}$$

A Slave function (s) can be written together with master and the state equations are arrived as,

$$x = \begin{bmatrix} x_m \\ x_s \end{bmatrix} \tag{2}$$

Dynamical form of these systems can be summarized as,

$$\dot{x}_m = g(x_m, x_s) \tag{3}$$

$$\dot{x}_s = h(x_m, x_s) \tag{4}$$

According to the method of Pecora and Carroll [25], a copy of slave circuit x_s is driven together with master circuit x_m as follows,

$$\dot{x}_m = g(x_m, x_s) \tag{5}$$

$$\dot{x}_s = h(x_m, x_s) \tag{6}$$

$$\dot{x}_s' = h(x_m, x_s') \tag{7}$$

If time goes to infinity, and the difference $|x_s - x_s'|$ converges to zero, and x_s and x_s' become identical and synchronization is provided. As the first step, the formation of chaotic masking and decryption is made as in Fig. 1. Initially, the chaotic signal $c(t)$ is added to the regular sequence of image pixels values “information data”, then it is transmitted to the receiver for the subtraction of chaotic data and decipher the image.

The state equations for the master circuit are given by,

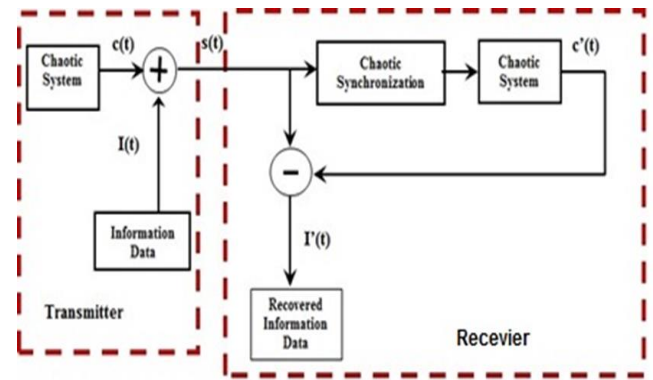


Figure 1. The block diagram of the non-autonomous chaotic secure communication system.

$$\begin{aligned} \dot{x}_m &= \alpha \ln(x_m + 1) + \beta \sin(u_m) - z_m \\ \dot{y}_m &= -\alpha \ln(y_m + 1) + \beta \sin(u_m) - z_m \\ \dot{q}_m &= \left(\frac{L}{R} I_s\right) z_m \end{aligned} \tag{8}$$

$$\dot{u}_m = \Omega \frac{L}{R}$$

Here x and y denotes the currents flowing from the branches and z is the phase of the feeding voltage. Besides, $\alpha=kT/e$ as the exponent of diode and $\beta=V/L$, where V denotes the maximal applied voltage and L is nothing else than the inductance of the inductor. I_s gives the saturation current of the diode. x_m, y_m, z_m, y_m, q_m and u_m gives two diode currents, total of diode currents, charge accumulated on a diode and voltage angular frequency. Similarly the equations for the slave circuit are

$$\begin{aligned} \dot{x}_s &= \alpha \ln(x_s + 1) - z_s \\ \dot{y}_s &= -\alpha \ln(y_s + 1) - z_s \end{aligned} \tag{9}$$

$$\dot{q}_s = \left(\frac{L}{R} I_s\right) z_s$$

The slave circuit gets the charge amount q from the main branch over two branches of slave circuits. Thus, that process can be described by,

$$\begin{aligned} \dot{x}_s &= \alpha \ln(x_s + 1) - z_m \\ \dot{y}_s &= -\alpha \ln(y_s + 1) - z_m \\ \dot{q}_s &= \left(\frac{L}{R} I_s\right) z_s \end{aligned} \tag{10}$$

Since the secure communication requires a high order synchronization to decipher the signal, the functions x_s, y_s and q_s are controlled by the main current branch of the master circuit. When the information signal is transmitted to the system, the equations are defined as,

$$\begin{aligned} \dot{x}_s &= \alpha \ln(x_s + 1) - s(t) \\ \dot{y}_s &= -\alpha \ln(y_s + 1) - s(t) \\ \dot{q}_s &= \left(\frac{L}{R} I_s\right) z_s \end{aligned} \tag{11}$$

In the chaotic modulation part, two methods are generally used in order to combine the information signal and the chaotic carrier signal. One is called chaotic parameter

modulation [27] and the other is chaotic non-autonomous modulation [26] as used in the present study. Signal $I(t)$ represents the information signal and modulates certain parameters within the transmitter of the chaotic system. At the receiver part, the slave part is synchronized in terms of Eq. 10. Therefore, the synchronization error approaches to zero. In the present study, the classical cryptographic technique and chaotic synchronization are combined and that enhances the communication security. In order to apply the chaotic output to the image, the process in Fig. 2 has been applied [28].

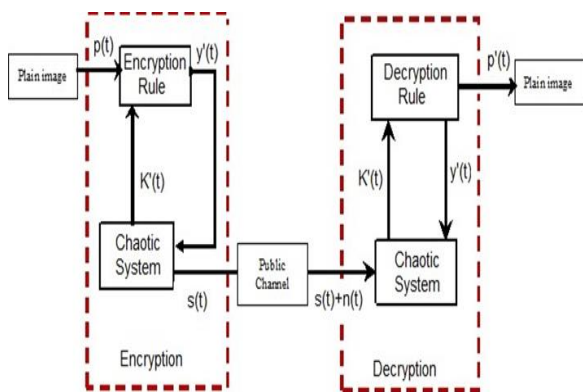


Figure 2. Plain image transmission and receive via the chaotic encryption and decryption

The encryption signal drives the chaotic system, when a transmitter transmits signal in a public channel, which any intruder can get but since that intruder is unable to get the hardware key, it becomes close to impossible to get $p(t)$ from $s(t)$. On the receiver's end, the signal $r(t) = s(t) + n(t)$ is received, while $n(t)$ channel noise synchronizes the chaotic systems. After the chaotic synchronization, signals $k(t)$ and $y(t)$ are recoverable at the receiver end though with some noise denoted by $k'(t)$ and $y'(t)$ for the real-time based plain image. The chaotic signal starts from the main branch of master circuit, the masking and recovery circuit including the master and slave parts (Fig 3). In addition to Master circuit (M) and Slave circuit (S), the Adder circuit (Au) and the Recovery circuit (Su) are also shown in Fig. 3. The Au circuit gets the chaotic signal from M and combines it with the $I(t)$ signal and later, the masked signal is transmitted to the Su circuit and the chaotic part is subtracted through the slave circuit and a clear $I(t)$ signal is obtained. R2L2D analog chaotic circuits have been simulated in NI Multisim software [29]. Fig. 4 shows the experimental circuitry in line with Fig. 3.

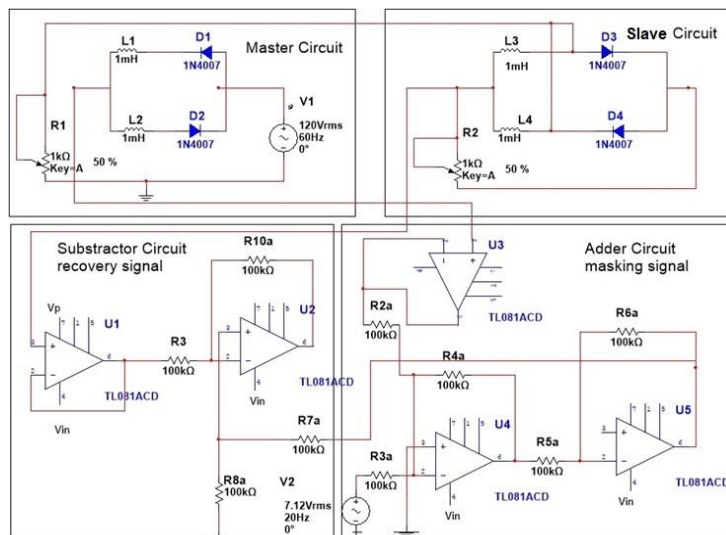


Figure 3. Secure communication system scheme



Figure 4. Circuit system communication

3. IMAGE ENCRYPTION AND DECRYPTION TECHNIQUE

The algorithms for the image encryption use the digital random generation or chaotic maps with mathematical algorithm based on complex mathematical steps, which have drawbacks such as small key spaces, slow performance and weaker security. The new image encryption technique proposed in this paper depends on a R2L2D chaotic circuit for secure image transfer without saving any images and or secure keys since it is a real-time-based technique. The circuit parameters are enough to recover the data and no other parameter, image or secure key are not required for the receiving side. The new technique for the secure image encryption / decryption is depicted in Fig. 5. The arrival of the ciphered image is sufficient to have the original image.

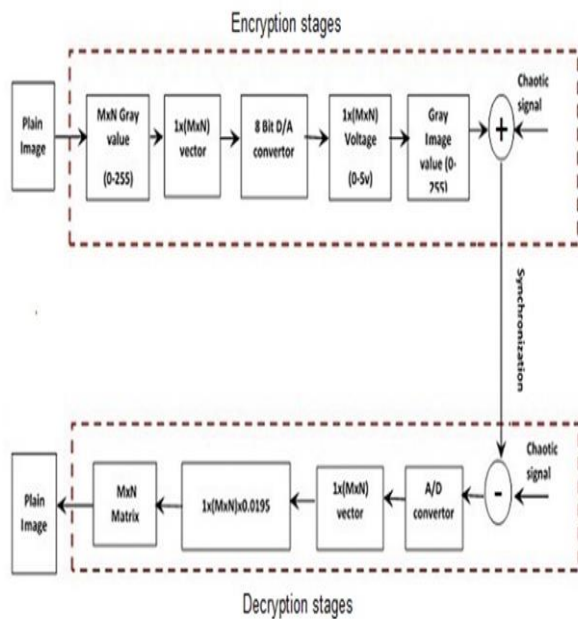


Figure 5. The encryption/decryption technique

3.1. Image Encryption

Gray scale images have gray levels from 0 (black) to 255 (white) in the secure image communication study. These values mean that every pixel is eight bits (i.e. one byte). In the present study, we focused on applying gray scale matrix by using MATLAB software and that matrix then converted to an analog signal. Initially, the real images were converted into the gray images to obtain the gray image matrix with size $M \times N$. Here M represents rows and N columns. The matrix is transferred into double type matrix for the mathematical operation. Conversion of gray image matrix to the analog voltage can be done via an 8 bit D/A converter circuit. It is responsible to convert image matrix to the analog voltages via real time transfer. R2R resistors DAC [30] convert digital to analog voltage. It consists of resistors for every bit of output and they are linked with the summing point for providing output. The output v_{out} is determined by Eq. 12 for N bits.

$$v_{out} = v_{ref} \sum_{i=0}^n b_i \frac{1}{2^{i+1}} \quad (12)$$

8bits represent image gray scale pixels between 0 and 255, thus by 8 bits one can represent 255 values by introducing a conversion constant. Fig. 6 shows the R2R D/A, where $R=0.5 \text{ K}\Omega$ and $2R=1 \text{ K}\Omega$

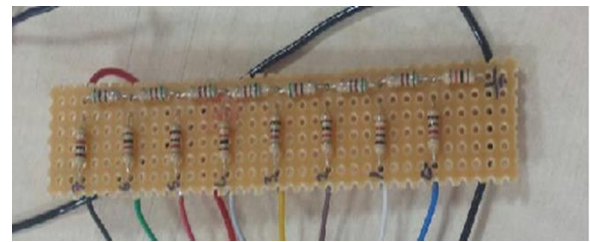


Figure 6. 8 Bits R2R D/A

The image gray scale pixels are converted from (0-255) interval to (0-5V) by using that D/A converter by following the schema in Fig. 7. The converter converts 5 volts into 255 grays with a step value of $5/255 = 0.0195 \text{ V}$. The output amplitudes should be equal to the step voltage value multiplied by the binary input (i.e. for instance, $129 = 1000 \ 0001$ in binary form). Thus, the output voltage should be $129 \times 0.0195 = 2.451\text{V}$ in that case. The conversion is linear as shown in Fig. 8

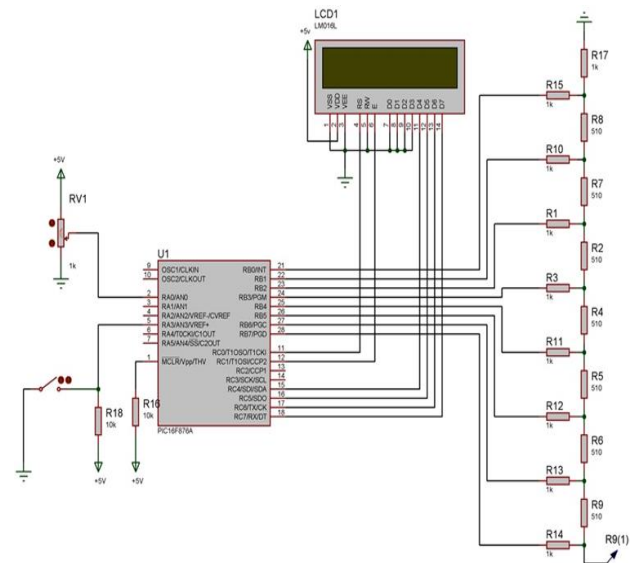


Figure 7. An 8 bit D/A converter schema

To confirm our values and sorting values, we used LCD screen that shows a number of rows and columns during the conversion process. In addition, we used a simple potentiometer to reduce the delay time during the transmission of the gray image signal. Using the Potentiometer allows one to initiate the sending time and their readability by MATLAB code. Simulation of the system has been performed by a Proteus software. The output voltages are obtained same with the findings from Eq. 8.

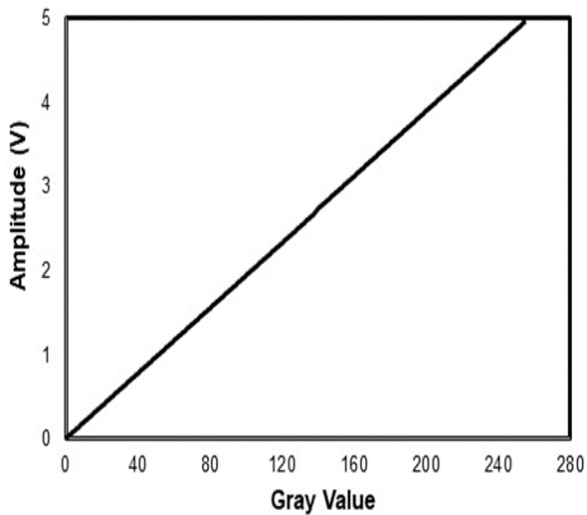


Figure 8. The plot of gray level versus amplitude for the conversion in D/A converter.

The gray value, number of rows/columns, and delay time have been observed on the LCD screen as in Fig. 9.

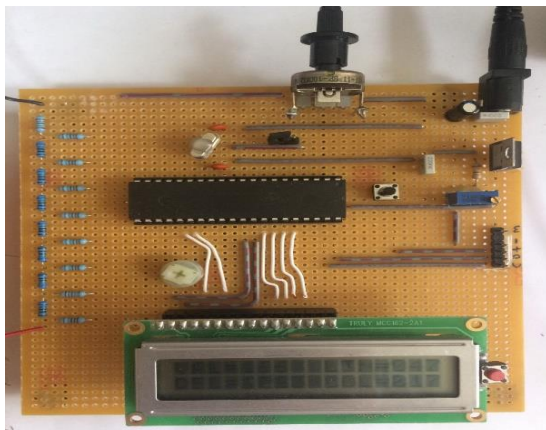
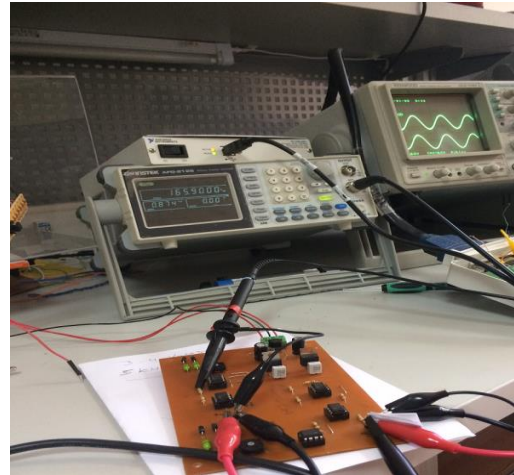
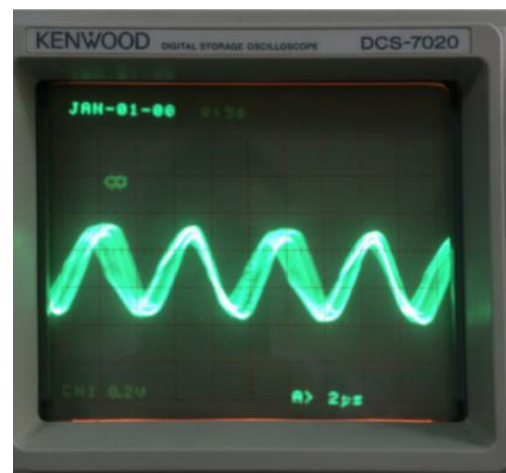


Figure 9. An 8 bit D/A circuit in board.

Then, the initial condition for chaotic signal in R2L2D circuit should be configured in the Master unit by applying sine wave signal in the master unit and also for configuring initial condition (frequency, amplitude voltage and value of resistor) to obtain chaos signal as shown in Fig. 10(a,b). Image gray signal comes from the D/A converter to the adder circuit. After the adding process, the encrypted signal is send through the insecure channel. Fig. 11 shows the total transmitting circuit including the adder and D/A converter.



(a)



(b)

Figure 10. (a) Setup and (b) a sample chaotic signal from the oscilloscope.

3.2. Image Decryption

After the encrypted image is transmitted to the receiving body, it should be decrypted. In order to decrypt the image, there is no condition required for the receiving body. Since the system operates real time, then receiver can directly decrypt the masked image. The decryption uses the following steps:

Step 1: In the receiver part including the slave circuit, the pure chaotic signal is subtracted from the decrypted signal and the gray levels of the image signals are obtained.

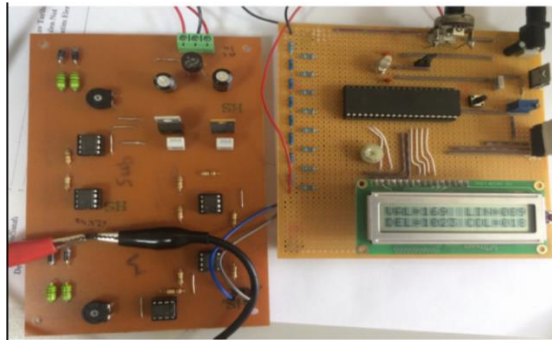


Figure 11. The combination of the transmitter and D/A converter

Step 2: The analog image signals from the subtraction circuit are converted to the digitalized media into a data file. That A/D converter unit is shown in Fig. 12. An Arduino Uno works well with an absolute accuracy within the error ranges $\pm 10\text{mV}$.

Step 3: After the extraction of the voltage values for the gray levels, they are converted to the real gray level values, thereby the decrypted image is obtained at last step. The receiver part subtracts the encrypted signal from the masked signal with a high accuracy as shown in Fig. 13. According to Fig. 8, those values are converted into the real image gray levels in the MatLab media.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

The quality of the encryption of the images depends on sending and reading processes. Strictly speaking, the signal, which is transmitted and received from/to the analog circuit can lose its originality, thus, it may cause a certain error. Therefore the quality of the conversion circuit and its connection are vital to fulfill the image quality in masking and recovering.

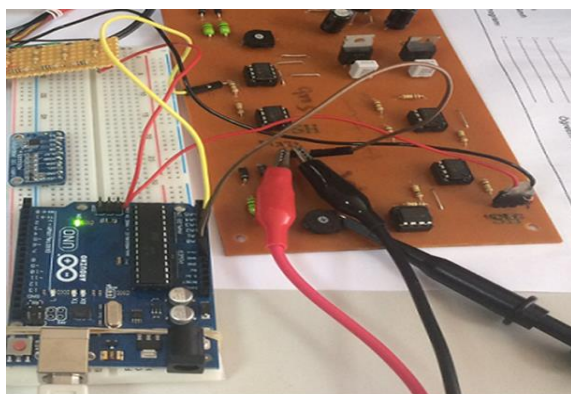


Figure 12. The subtraction circuit and the Arduino A/D converter in the receiver part

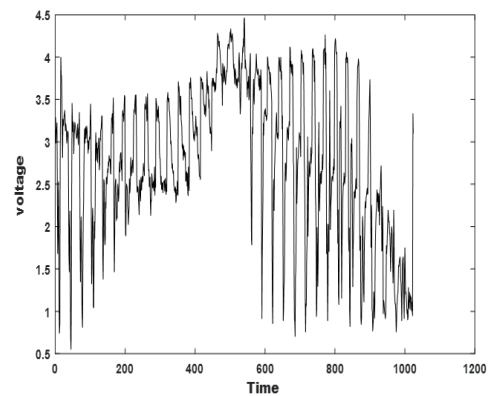


Figure 13. The decrypted gray level signals after the A/D converter

Fig. 14(a,d,g,j) shows the original test image, the encrypted ones are shown in Fig. 14(b,e,h,k) and finally Fig. 14(c,f,i,l) shows the decrypted image. Note that the images are tested for their 32×32 pixel image forms.

5. RESULTS AND DISCUSSION

The tests on the encrypted images are important in order to make the communication in a safe way from the public channel shown in Fig. 2. In that part, the histogram analyses, pixel correlation tests and error measurements have been carried out.

5.1. Histogram analysis

Histogram analysis is important in the sense that the factors measuring the image encryption, prevent information leakages to insecure sources or opponents, because the encrypted images have no statistical resemblance with the originals. In order to test the histogram, the original and encrypted images are considered. After the measurements of histograms, Fig. 15(a-h) has been plotted. Note that the encrypted images have more distributed histograms, which prove good encryption.

From the histograms, it is found that the most powerful encryptions were performed for Figs. 14(d) and (g). Strictly speaking, the histograms of the genuine images are in the form of clustered spikes, the encrypted images have a broader distribution to all gray levels.

They are also different from the histograms of the genuine images by annihilating these clustering appearances. Histograms of encrypted images do not give any kind of information regarding the original images. They can be acceptable as secure images in the communication since no effort to decrypt those images by any unauthorized person can be successful in that manner.

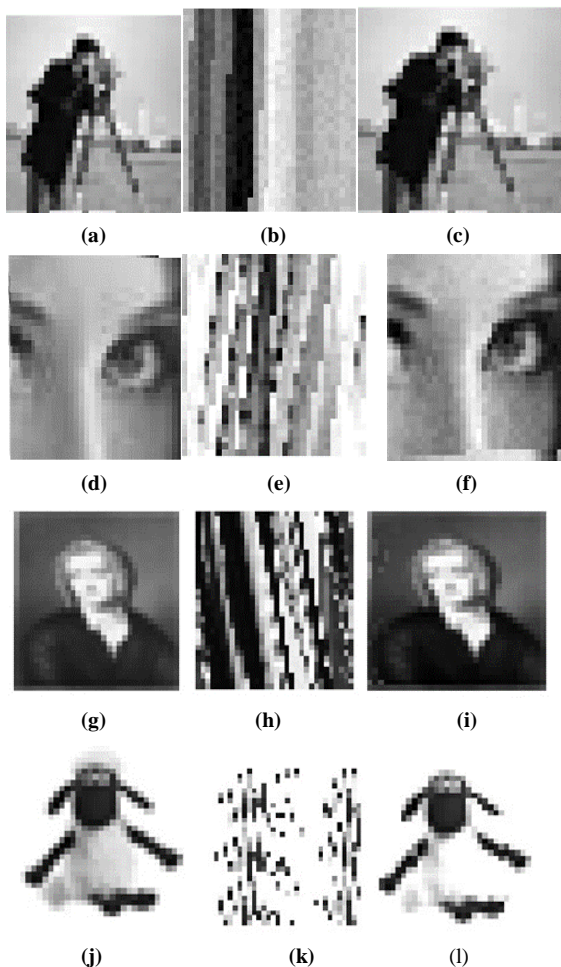


Figure 14. The images for testing. The original transmitted images (a,d,g,j), the crypted ones (b,e,h,k) and the decrypted forms (c,f,i,l).

5.2. Pixel Correlation

In the digital images, usually high redundancy data exists and those show high correlation between neighboring pixels. By definition, a good cryptal system should reduce that correlation. Indeed, that becomes a major defense against the statistical attacks. The correlation coefficients of the encrypted pixels for different sizes of images have been calculated for both the original and the encrypted images within that test. The data correlation is defined as ρ or *corr*, which is the coefficient of correlation. Besides, X and Y are datasets, and μ is the mean value in the standard deviation. When variables X and Y are highly correlated, the ρ value would be closer to one. For instance, a positive correlation coefficient indicates that as one variable increases, the other also increases or vice versa. The opposite is true if their ρ value is closer to zero. Zero indicates that the variables are not correlated in this context. The coefficient correlation can be read as,

$$\rho_{x,y} = corr(X, Y) = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E((X - \mu_X)(Y - \mu_Y))}{\sigma_X \sigma_Y} \tag{13}$$

Here E is the expected value and *cov* stands for the covariance. The correlation between the original and the encrypted images are given in Table 1 for their 32x32 dimensions.

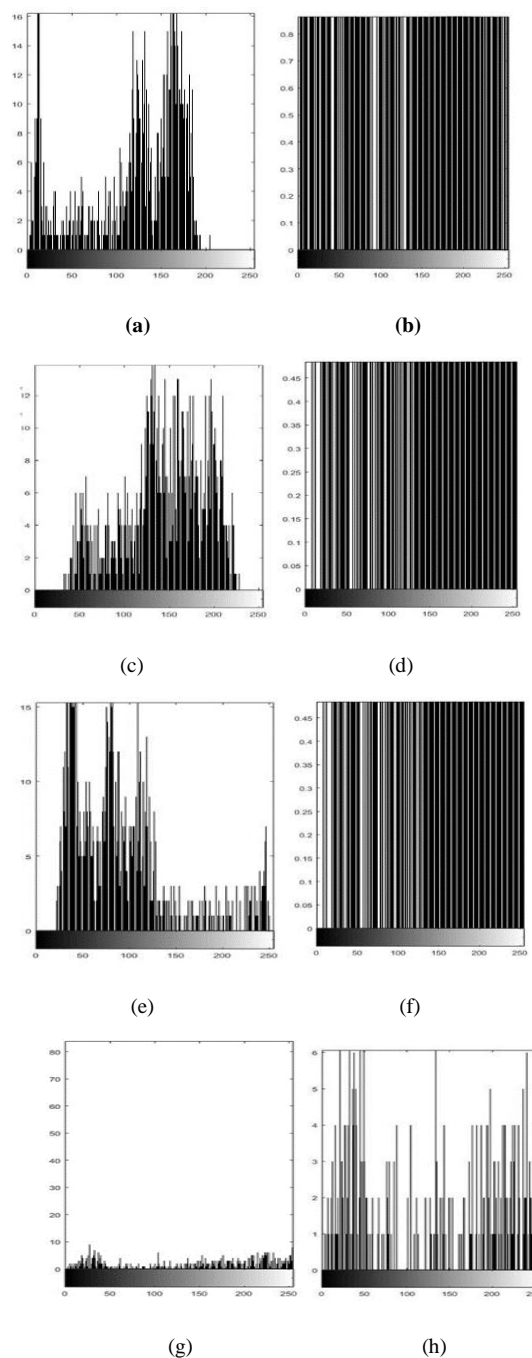


Figure 15. Histogram test results of the decrypted images given in Fig14.

Generally speaking, while the correlations are higher between the original and decrypted images, the correlations decay to 0.35 or lower values between the original and encrypted images as expected.

Table 1. Correlation coefficients of the original and encrypted images

| Image Name | Correlation Coefficients | |
|------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | Between original And Encrypted Images | Between Original-And Decrypted Images |
| Cameraman | 0.3584 | 0.897 |
| Lena | -0.374 | 0.847 |
| Man | 0.215 | 0.698 |
| Sheep | -0.0152 | 0.713 |

5.3. Error Measurement

The main error source is the real time conversion of the images via the analog to/from digital platform. Indeed, the experimental measurements of output analog signals should also have an absolute error as in all real time devices. Such errors have been measured and calculated as in Table 2 .

While the lowest error is obtained for Lena, the largest one is calculated for sheep. However, for a real time cryptal system error amount about 5% is within the acceptable limits

Table 2. Error Measurements with respect to test images.

| Images | Error (Original- Decrypt) |
|-----------|---------------------------|
| Cameraman | 4% |
| Lena | 3.7% |
| Man | 3.9% |
| Sheep | 5.3% |

6. CONCLUSIONS

In the present study, a new chaos based secure image communication technique has been designed and implemented. The new technique uses a new proposed chaotic synchronization circuit in master/slave form and masks the plain image gray levels into the chaotic signal, transmit it with a public channel and recover it with a sufficient accuracy within 5% in a real-time based environment. Since the system operates in real time, it is more secure than any other cryptal systems. Because synchronization between the sender and receiver are ascertained for only the sending time period, thus one cannot recover the image without having the same chaotic signal. In addition, the analog equipment is important to have the same chaotic output. In this regard, if the public does not have the correct circuitry and

connection time and transmission time duration, they would never recover the plain image.

Besides, the technique is useful because it does not need to save any digital data while sending gray images to the receiver, because they are converted to the noisy signals in a synchronized way. Thus, that technique is better, reliable and fast compared to the other traditional techniques.

In fact, a digital media is always unsecure due to software developments among the hackers, improvements in internet systems, etc., and that has the digital environment been weak for such secure communication systems. Thereby, that new real time based technique can be used to make more secure image communication in this manner. The only disadvantage which has was encountered in that technique was a little noise in the decrypted image, however if larger memory is used, that disadvantage can be annihil.

REFERENCES

- [1] Murali, K., Lakshmanan, M. and Chua, L.O., “The simplest dissipative nonautonomous chaotic circuit”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 41(6): 462-463, (1994).
- [2] Kurt, E., Acar, S. and Kasap, R. ,“A comparison of chaotic circuits from a statistical approach.”. *Mathematical and Computational Applications*,. 5(2): 95-103, (2000).
- [3] Adak, S., Cangi, H. and Yilmaz, A.S.,”Design of an LLCL type filter for stand-alone PV systems’ harmonics.” *Journal of Energy Systems*,; 3(1): 36-50, (2019).
- [4]. Kiers, K., Schmidt, D. and Sprott, J.C ,“Precision measurements of a simple chaotic circuit. *American Journal of Physics*, 72(4): 503-509, (2004).
- [5] Linsay, P.S., “Period doubling and chaotic behavior in a driven anharmonic oscillator.” *Physical Review Letters*, 47(19):1349.,(1981).
- [6] Kurt, E., “Nonlinearities from a non-autonomous chaotic circuit with a non-autonomous model of Chua’s diode”. *Physica Scripta*,.74(1): 22, (2006).
- [7] Haniias, M., Avgerinos, Z.and Tombras, G.,”Period doubling, Feigenbaum constant and time series prediction in an experimental chaotic RLD circuit”. *Chaos, Solitons & Fractals*, 40(3):1050-1059, (2009).
- [8] Andreatos, A.S.and Volos. C.K,“Secure text encryption based on hardware chaotic noise generator. in *2nd International Conference on Cryptography and Its Applications in the Armed Forces*, (2014).
- [9]. Feki,M.,”An adaptive chaos synchronization scheme applied to secure communication.” *Chaos, Solitons & Fractals*, 18(1):141-148, (2003).
- [10]. Cuomo,K.M.,”Oppenheim, and S.H. Strogatz, Synchronization of Lorenz-based chaotic circuits with applications to communications.”*IEEE Transactions on circuits and systems II: Analog and digital signal processing*,. 40(10): 626-633, (1993).

- [11]. Mu, X. and Pei, L. "Synchronization of the near-identical chaotic systems with the unknown parameters." *Applied Mathematical Modelling*, 34(7): 1788-1797, (2010).
- [12]. Yang, T., "A survey of chaotic secure communication systems." *International Journal of Computational Cognition*, 2(2): 81-130, (2004).
- [13]. Bourbakis, N. and C. Alexopoulos, Picture data encryption using scan patterns. *Pattern Recognition*, 25(6): 567-581, (1992).
- [14]. Pisarchik, A. and Zanin, M. "Image encryption with chaotically coupled chaotic maps". *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 237(20): 2638-2648, (2008).
- [15]. Xiangdong, L., "Image scrambling algorithm based on chaos theory and sorting transformation." *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 8(1): 64-68, (2008).
- [16]. Hu, J. and Han, F., "A pixel-based scrambling scheme for digital medical images protection". *Journal of Network and Computer Applications*, 32(4): 788-794, (2009).
- [17]. Tong, X. and M. Cui, "Image encryption scheme based on 3D baker with dynamical compound International Journal of Bifurcation and chaos, cipher generator". *Signal processing*, 89(4): 480-491, (2009).
- [18]. Fridrich, J., "Symmetric ciphers based on two-dimensional chaotic maps." *International Journal of Bifurcation and chaos*, 8(06): 1259-1284, (1998).
- [19]. Gao, H., "A new chaotic algorithm for image encryption" *Chaos, Solitons & Fractals*, 29(2): 393-399, (2006).
- [20]. Rulkov, N.F., "Generalized synchronization of chaos in directionally coupled chaotic systems." *Physical Review E*, 51(2): 980, (1995).
- [21]. Zhou, Q., "Parallel image encryption algorithm based on discretized chaotic map". *Chaos, Solitons & Fractals*, 38(4): 1081-1092, (2008).
- [22]. Shelke, F.M., Dongre, A.A and. Soni, P.D " Comparison of different techniques for Steganography in images"., *International Journal of Application* , (2014).
- [23]. Celik, K. and Kurt. E." A new image encryption algorithm based on lorenz system. in Electronics", Computers and Artificial Intelligence): *8th International Conference on. IEEE*, (2016).
- [24]. Kurt, E. and Bingol, C. "A New Sweep Up/Down Phenomenon between the Chaotic and Regular Regions in a New R2L2D Circuit," *Politeknik Dergisi*, 19(3): 305-310, (2016).
- [25]. Pecora, L.M. and Carroll, T.L, "Synchronization in chaotic systems" *Physical review letters*, 64(8): 821, (1990).
- [26]. Wu, C.W. and. Chua, L.O."A simple way to synchronize chaotic systems with applications to secure communication systems." *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 3(6): 1619-1627, (1993).
- [27]. Yang, T. and. Chua, L.O "Secure communication via chaotic parameter modulation. IEEE" *Transactions on Circuits and Systems: Fundamental Theory and Applications*, 43(9): 817-819, (1996).
- [28]. Yau, H.T. and Yan, J.J."Chaos synchronization of different chaotic systems subjected to input nonlinearity" *Applied Mathematics and Computation*, 197(2): 775-788, (2008).
- [29]. Kurt, E. and Bingol, C., "Exploration of Synchronization Secure Communication and Signal Recovery in New R2L2D Circuit," *58th Int. Sci. Conf. Riga Tech. Uni. Power and Elec. Eng. RTUCON*. Riga, Latvia. (2017).
- [30]. Hendriks, P., "Specifying communications dacs. *IEEE spectrum*," 34(7): 58-69. (1997). Power and Elec. Eng. RTUCON2017, 12-13 Oct. 2017, Riga, Latvia.



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Effects of character recognition with Shell histogram method using plate characters

Plaka karakterleri kullanılarak shell histogram yöntemi ile karakter tanıma

Yazar(lar) (Author(s)): Rukiye UZUN ARSLAN¹, Mürsel Ozan İNCETAŞ², Sedat DİKİCİ³

ORCID¹: 0000-0002-2082-8695

ORCID²: 0000-0002-1016-1655

ORCID³: 0000-0001-8906-1245

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Arslan Uzun R., İncetaş M. O. and Dikici S. “Effects of character recognition with shell histogram method using plate characters”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1093-1099, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.593633

Effects of Character Recognition with Shell Histogram Method Using Plate Characters

Araştırma Makalesi / Research Article

Rukiye UZUN ARSLAN¹, Mürsel Ozan İNCETAŞ², Sedat DİKİCİ¹

¹Zonguldak Bulent Ecevit University, Engineering Faculty, Department of Electrical & Electronics Engineering, Zonguldak, Turkey

²Alanya Alaaddin Keykubat University, ALTSO Vocational School, Department of Electric and Energy, Antalya, Turkey

(Geliş/Received : 18.07.2018 ; Kabul/Accepted : 20.08.2018)

ABSTRACT

Character recognition is a study that has been used in various fields for many years. In character recognition, the aim is to identify the various texts, letters and symbols in the images as accurately and quickly as possible. In addition to the Optical Character Recognition (OCR) method, which is used as a very common method, there are many feature extraction methods in which character image features are compared. In this study, which is presented as another feature extraction method, the letters on the license plates are recognized. The characters were examined using the circular shape histogram technique and histograms were obtained from the sectors within the circular regions. Feature vectors for letter characters were created using character pixel densities in sectors. Feature vectors are analyzed linearly and an alternative quick character recognition method is presented. With the proposed method, the element numbers of the feature vectors are kept constant. In this way, both the processing speed is increased and the processing speed variations are minimized. The results show that the proposed method requires lesser parameters than the OCR method, but also has a significant success rate according to known feature extraction methods.

Keywords: Character recognition, feature extraction, shape histogram.

Plaka Karakterleri Kullanılarak Shell Histogram Yöntemi İle Karakter Tanıma

ÖZ

Karakter tanıma çalışmaları, uzun yıllardan beridir çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Karakter tanıma işleminde amaç görüntüler içerisindeki çeşitli yazı, harf ve simgelerin olabildiğince doğru ve hızlı bir şekilde tanımlanmasıdır. Çok yaygın bir yöntem olarak kullanılan Optik Karakter Tanıma (OKT) yönteminin yanı sıra karakter görüntü özelliklerinin karşılaştırıldığı birçok özellik çıkarım yöntemi de mevcuttur. Bir başka özellik çıkarım yöntemi olarak sunulan bu çalışmada araç plakalarındaki harflerin tanınması amaçlanmıştır. Karakterler dairesel şekil histogramı tekniği kullanılarak incelenmiş ve dairesel bölge içerisindeki sektörlerden histogramlar elde edilmiştir. Sektörlere ait histogramlar kullanılarak harf karakterlerine ait özellik vektörleri oluşturulmuştur. Özellik vektörleri doğrusal olarak analiz edilerek, alternatif bir hızlı karakter tanıma yöntemi sunulmuştur. Önerilen yöntem ile özellik vektörünün eleman sayısı sabit tutularak hem işlem hızının artırılması hem de işlem hızındaki değişkenliğin minimuma indirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin OKT yöntemine göre daha az işlem yükü gerektirmesinin yanı sıra bilinen özellik çıkarım yöntemlerine göre de kayda değer bir başarı oranına sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Karakter tanıma, özellik çıkartımı, şekil histogramı.

1. INTRODUCTION

Character recognition is the process of converting characters in hand-written or images into computer environment, correctly. Character recognition that allows the characters in printed or digital media identified accurately and converted to editable text data, is used many different application areas such as, the recognition of the money or the checks in banking, the exaction of the texts to computers automatically in librarianship, automatic detection of the license plates of vehicles on the freeway etc [1, 2]. Character recognition is generally performed by two main methods. One is the Optical

Character Recognition (OCR) method in which all character pixels are matched, while the other is the feature extraction method in which the attributes obtained from the pixel groups of the characters are used as distinctive.

At the OCR method forming the basis of character recognition studies, the closest letter/number is selected by matching the all pixels of the characters with the character pixels in the database [3]. In literature, it was shown that high performances have been achieved with the use of this method also named as template matching [4-8]. For instance, it was obtained 97.6% success rate with applying this method in a study on which high quality images were used [4]. Shapiro et al. [5] (2006) and Targian et al. [6] had achieved success rates of 98.2%

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : rukiyeuzun67@gmail.com

and 97.18%, respectively, by utilizing OCR method to identify characters accurately. In this method, it can be obtained high success rate whereas lots number of operation necessitate because of the usage of whole pixel groups. Besides, in this method, database should be comprised from templates in which different character fonts can be matched. This causes lots of operation and data density in analyses. Therefore, It has been improved various feature extraction methods alternative to OCR.

The purpose of feature extraction methods is that character recognition can be done with less operation, by extracting feature vectors having specified number of element instead of matching of whole pixels. Common feature extraction methods include horizontal and/or vertical projection and sub-blocks techniques. In the horizontal and/or vertical projection techniques, the character region is scanned horizontally and vertically. The number of character pixels at the scanned direction is found with sum of the character pixels in this direction. Thus, the feature vector of the character is formed with the numbers of character pixels in each row or column. Kim and Chien [9] achieved a success of 85.5% in character recognition by using the vertical projection method. In the sub-blocks technique, the character zone is divided into small rectangular regions of certain dimensions and feature vectors are obtained with pixel densities in these regions. Amit et al. [10] created the feature vectors with pixel densities in the 5x5 rectangular areas of the character region and achieved a 94% character recognition success for 520 characters. The element numbers of feature vectors vary, depending on the dimensions of the characters and images at both the sub-block technique and the horizontal and/or vertical projection technique. For instance, in the horizontal and/or vertical projection techniques, element numbers of the feature vectors of characters will be different since the lengths and widths of the characters are different. In the sub-blocks technique, the sub-block dimensions are constant regardless of the image size. Therefore, element numbers of feature vectors of character will be different. In this study, it is proposed a new feature extraction technique alternative to before mentioned techniques for systems where security is very important [11, 12]. The proposed technique takes advantage of the shape histogram generally used in image analysis [13]. To do this, the character zone is divided into 16 sectors by taking it into a circular grid. Then, character feature vectors is created with pixel densities in each sector. It was aimed to predict correctly by comparing the obtained feature vectors with all characters. The proposed technique enables to recognize characters by usage of less data.

2. MATERIAL and METHOD

2.1. Shape Histogram

In image processing, the histogram is defined as the statistical distribution of all gray levels of a digital image [14]. Shape histogram refers the gray level distributions

of the pixels at the regions obtained by dividing the areas of objects in the image in various ways. In order to calculate, compare and define the geometric similarity of objects, one can use shape histogram from which the feature vectors are obtained by the image segmentation [15]. In this context, Tangelder et al. [16] analyzed the image in a circular manner and proposed 3 different models. These models shown in Figure 1, respectively, are shell model formed with concentric shells, sector model divided circular area into equal sectors by concentric lines, and spider web model obtained by combining these two models.

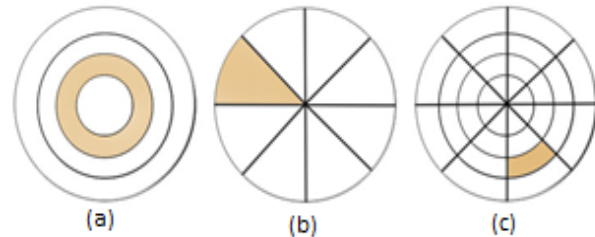


Figure 1. Circular shape histogram models (a) Shell model (b) Sector model (c) Spider web model

In the shell model, the center of the object is detected, then the object is separated into concentric shells beginning from the center, and the distribution of the pixels is generated based their distances from the center. In the sector model, object is divided into circular sectors by means of concentric lines at equal angles. In this model, feature vectors obtained by pixel distributions in each sector can be used to get pixel densities of the image at various directions. In the spider web model created by combining of both models (sector model and shell model), one can obtain the feature vectors that give information about the object in more detail. In this model, the object can be divided into different number of sectors and shells, and thereby, feature vectors in different structure can be obtained.

Figure 2 shows the shape histograms obtained by three models mentioned above for image containing a 'Z' character. When the pixel distributions of the object are examined in the shell model, especially in the shells 5, 6 and 7, it is clear that the pixel density is higher in middle shells. In the sector model, the separated regions are concentric and equal distance to the edges, and thus, it can be possible to determine direction on which pixels of the object are more intense. When the Z letter image is studied, it can be seen that pixel densities are high in sectors 6, 7, 15 and 16 whereas it is lower in sectors 4, 5, 12, and 13. This shows that Z letter has a rectangular shape, also is piled on top and bottom sides. Spider web model gives information about both the whole directions and the regions at different distances from the center of the object. Feature vectors can be created with the help of the shape histogram graphs obtained by using these models.

The feature is defined as a measurable function of each element's information [17]. Feature vectors are generated

by collecting in a series of the features of objects within the image, such as color, gray level distribution, edge information, and formal contents. These give quantitative information about images. Therefore, it is often used in studies such as character recognition [18], image matching, and similarity calculations [19]. In the literature, there are many studies that allow objects and their similarity to be identified by creating feature vectors with shape histogram [20-24].

2.2. Feature Extraction for Characters

The characters are different in shape and are separated from each other by these differences. In this study, Spider

In order to compose feature vectors, at first, characters should be detected in image and decomposed from each other. Therefore, color images converted to gray level are transformed to binary image and segmentation process is executed. In this study, Otsu method is used for binary transformation of image [25]. If pixel values in the image are greater than the threshold value T , their value are taken as 1 otherwise their value are 0, as given below:

$$G(x, y) = \begin{cases} G(x, y) = 0; & x < T \\ G(x, y) = 1; & x \geq T \end{cases} \quad (1)$$

Image should be segmented so that the characters in the image can be processed as different objects.

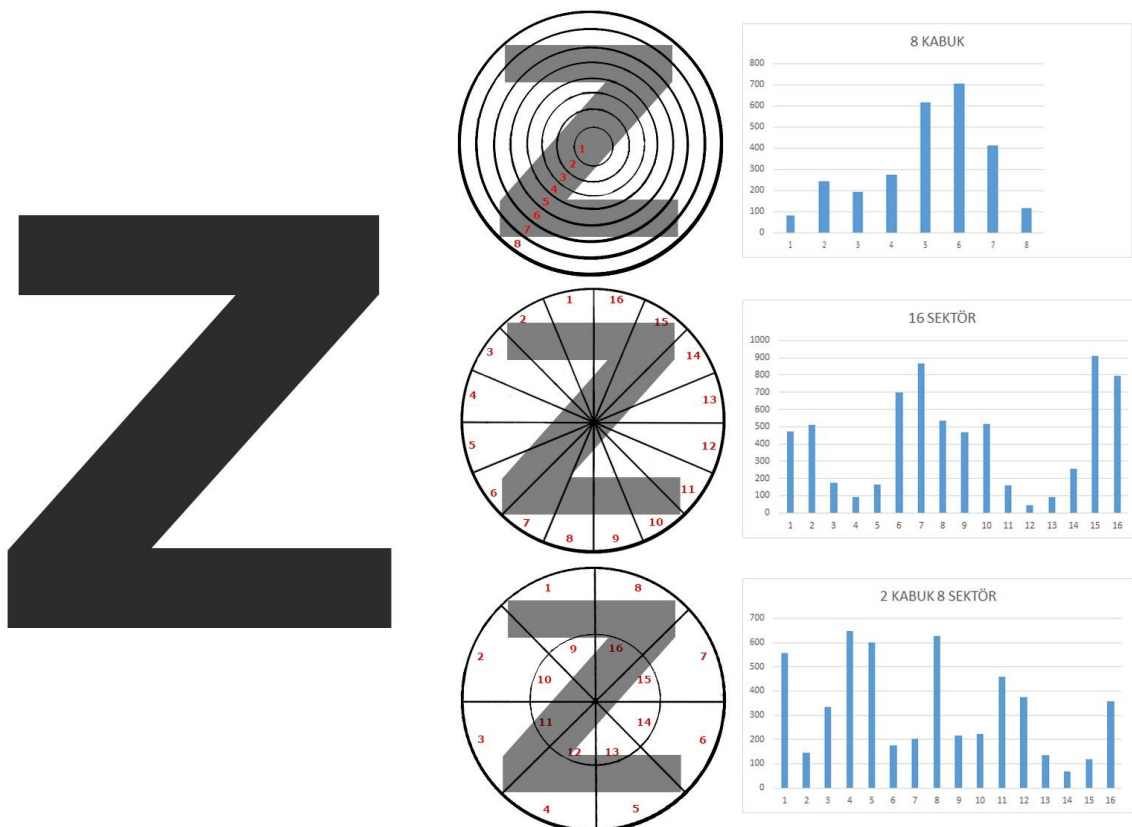


Figure 2. Shape histograms of a letter

Web model shown in Figure 1c is used in order to exhibit these character differences statistically. To introduce characters to the database, it is used 4 different font styles which are commonly preferred in license plates in Turkey (Figure 3). In this context, first, all characters are divided into sections by means of circular shape histogram for each font style. Then, a single feature vector is composed for each character by averaging of the feature vectors obtained from the character pixel densities in all sections.

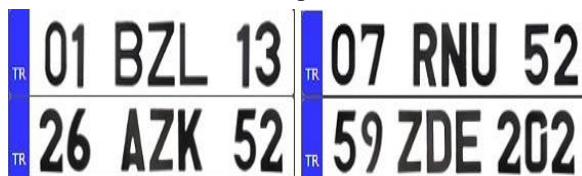


Figure 3. Commonly preferred license plates fonts in Turkey

Segmentation is generally the process of separating regions having different characteristics. In this study, the segmentation of the images converted to the binary format is performed by the usage of labeling method in decomposing of the characters. In the labeling method, the pixels of the binary image are enumerated by scanning vertically and horizontally. For each scanned pixel, the neighborhood with the previously labeled pixels is checked. Different groups of pixels without any neighboring relationship are given new label numbers, so that the non-connected shapes are separated. The transformation of an image to binary format, the segmentation and labelling of the inverted image is shown in Figure 4.

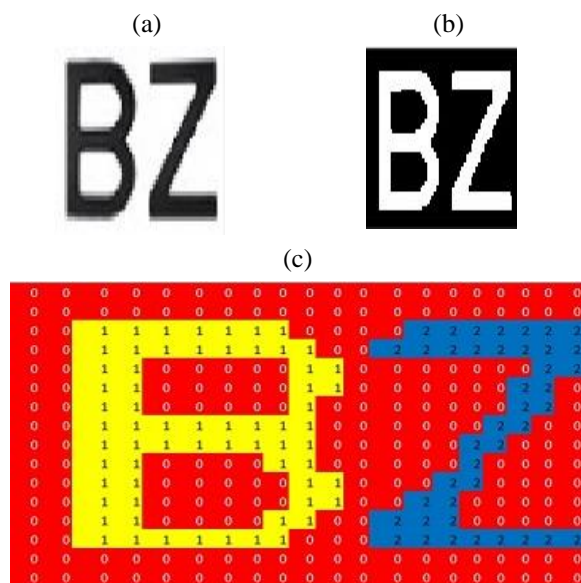


Figure 4. (a) Binary image (b) Inversed binary image (c) Labelling and segmentation of the characters

In the study, 16 element circular shape histogram is used to obtain the feature vector for each character separated by labeling. While the histogram is being created, the central position of each character is determined, the distance of the character pixel farthest from this position is calculated and the diameter of the circular shape is identified. Thus, all of the character pixels are ensured to be in the circle. Then; an inner circle with a half diameter of the outer circle and inner cross sections dividing these circles into 16 sections by horizontal, vertical and diagonal are constituted. The pixels within the sections of the circular shape histogram have been used to compose 16-elements feature vectors of the characters. Figure 5 illustrates examples of the separation of various characters into sectors.

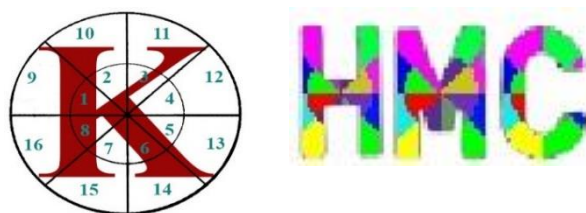


Figure 5. Analyses of the characters by using shape histogram

By separating each character into 16 sections and calculating the Sector Character Pixel Count (SCNP) ratio as the total Sectoral Pixel Count (NSP), the 16-element feature vectors are created (consumed) for all characters in 4 different font styles. By taking the average of the 16-element feature with vectors created in the four different font style for the each character with Equation 2, a single feature vector (C_i) have been created for each character.

$$C_i[j] = \frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 \frac{SCNP_j}{NSP_j} \tag{2}$$

where j is the section of the circular shape histogram, C_i is 16-element feature vector of the each character and n indicates 4 different font style. Calculated C value is average of the feature vectors of each characters in the 4 different font style. Thus, a more general feature vector has been composed by the use of several different fonts instead of a single font for all characters. Figure 6 shows how the fifth element of the 16-element feature vector of the A character has been obtained by this method. The fifth element of the feature vector defined to database for the A character has been identified by taking average of pixel densities in the 5th sector of each font using Equation 3:

$$C_A[5] = \frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 \frac{SKPS_A}{SPS_A} = \frac{1+0,986+0,885+0,866}{4} = 0,934 \tag{3}$$

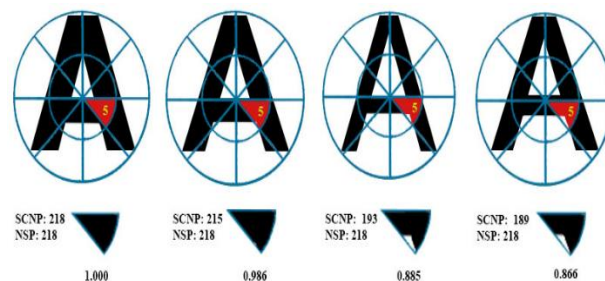


Figure 6. Calculation of pixel densities in one sector of shape histogram for 4 different font style of A character

The feature vectors obtained by the proposed this method are different for each letter. This is shown in Figure 7 by giving the distributions of the pixel densities of the letters A, E, G and T for each sector.

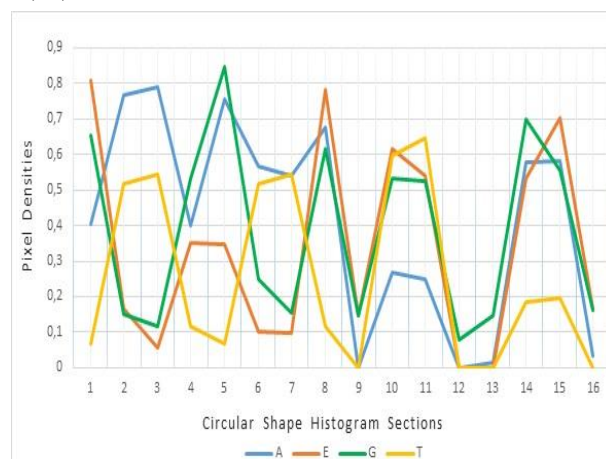


Figure 7. The feature vector graphs of A, E, G, and T characters

3. EXPERIMENTAL RESULTS

In the study, first, a database has been created from the 16-element feature vectors of the characters which are

used broadly in license plates in Turkish Republic by using circular shape histogram. The feature vectors have been composed from the average of the vectors in different font style for each letter. When recognizing a randomly selected character, a 16-element feature vector (R) has been extracted by usage of a circular shape histogram for that character. The obtained R vector has been compared linearly with each C_i vector in the database. The absolute differences between each element of R and C_i vectors have been summed and the error amount (E_i) has been calculated. The character candidate is determined from the minimum error rate inside the calculated E_i values for each 23 character as follows;

$$E_i = \min(\sum_{k=1}^{16} (|R[k] - C_i[k]|)) \quad (4)$$

personnel computer with an Intel® Core™ CPU at 2.93 GHz and 3 GB of RAM.

The success of the proposed method was examined for 65 license plate images involved two or three letters. The results of the recognition process, which have been analyzed for total 166 characters comprised at least of 7 from each character, are shown in Table 2. A success rate of 95.2% has been obtained by estimating 158 inside 166 characters accurately. Also, it has been observed that 8 characters could not be detected correctly and therefore the false detection rate is below 5%.

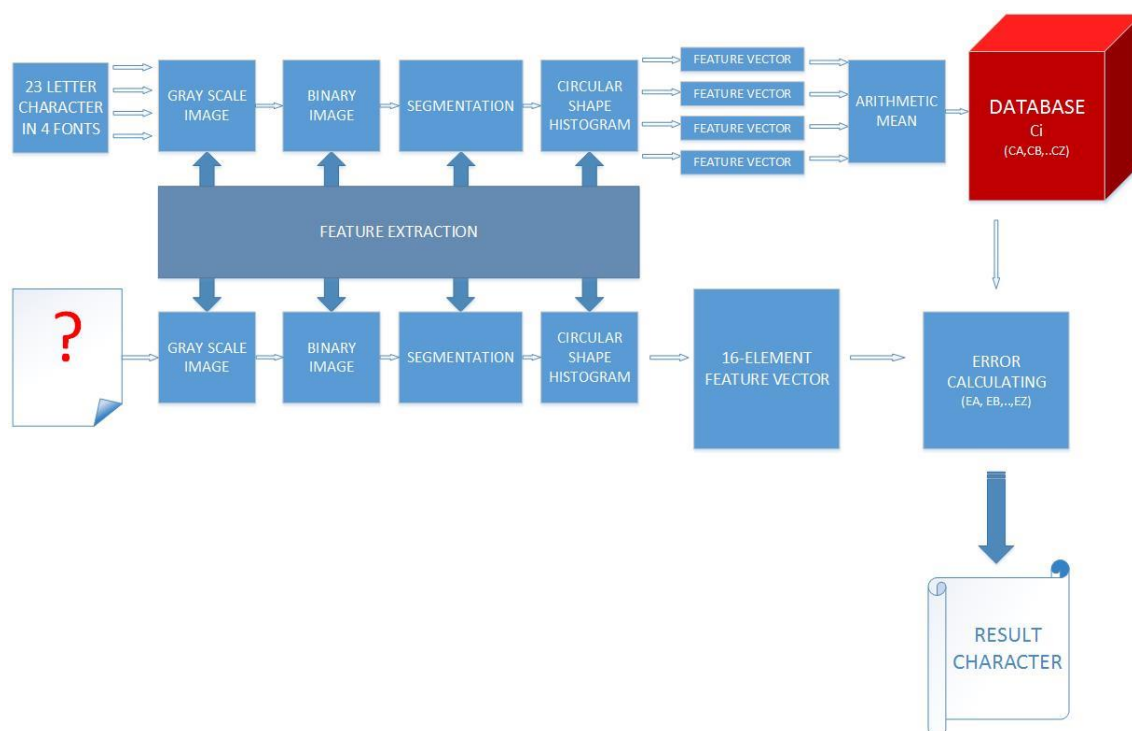


Figure 8. Flowchart of the proposed method

Table 1 shows the error rates that are calculated for some candidate characters (A , E , G , and T) taken from different images. The estimated character is ascertained from the character which has the minimum E value. According to the results obtained with the proposed method; A , E and T characters have been estimated correctly, whereas G character that has been matched by the character O has been misspecified.

Flow diagram of the proposed method for character recognition is given in Figure 8. As seen in the flowchart, a circular shape histogram is used to create the feature vectors of the characters as well as for character recognition processing. To our knowledge, there is no study that is similar to the proposed method in the literature. Matlab R2013a (Matrix Laboratory) is used as the development platform for experiments of the proposed method. These experiments are conducted on a

Table 1. The calculated E values for four different character

| i | A | E | G | T |
|-----|-----------------|-----------------|----------|----------|
| A | 0,815253 | 3,82751 | 4,377604 | 3,458174 |
| B | 3,440212 | 2,105279 | 2,621582 | 5,727891 |
| C | 4,70705 | 1,981152 | 2,116309 | 4,507834 |
| D | 3,930709 | 1,370409 | 1,485297 | 5,144262 |
| E | 3,278642 | 0,652764 | 2,555 | 4,97158 |
| F | 3,845415 | 1,309094 | 2,86 | 4,765772 |
| G | 3,416427 | 1,74672 | 1,789975 | 5,139554 |
| H | 3,815965 | 2,471358 | 2,075146 | 5,767321 |

| | | | | |
|---|----------|----------|-----------------|-----------------|
| I | 3,635459 | 5,278517 | 5,250398 | 1,098084 |
| J | 5,186898 | 3,435349 | 2,540187 | 4,861983 |
| K | 2,342303 | 3,520305 | 4,658852 | 2,819902 |
| L | 4,764721 | 2,470569 | 3,108852 | 5,253819 |
| M | 3,269051 | 4,329381 | 3,925233 | 4,389095 |
| N | 2,499087 | 3,437076 | 3,241693 | 4,639747 |
| O | 4,139176 | 1,708374 | 0,990495 | 5,093284 |
| P | 4,203337 | 2,069217 | 3,07204 | 5,29141 |
| R | 3,455557 | 2,300471 | 3,258419 | 4,500661 |
| S | 3,415852 | 2,24729 | 2,222329 | 4,464415 |
| T | 3,959938 | 4,923956 | 5,222651 | 0,722896 |
| U | 3,837007 | 1,841372 | 1,304278 | 5,36427 |
| V | 3,136176 | 4,05602 | 4,221265 | 2,907217 |
| Y | 2,806354 | 4,823425 | 4,855131 | 1,488691 |
| Z | 3,779771 | 3,50065 | 3,805722 | 2,64004 |

Table 2. Examined character number and success rate

| | Number | Rate |
|----------------------------------|--------|-------|
| Total Character | 166 | %100 |
| Correctly Recognized Character | 158 | %95.2 |
| Incorrectly Recognized Character | 8 | %4.8 |

4. CONCLUSION

Character recognition process have long been applied in many areas. In addition to OCR method developed for character recognition, new techniques used feature vectors have been proposed in recent years. In this study, a feature extraction method has been presented which increases the speed of analysis by using less number of elements. The number of elements of the feature vectors consumed by this method is kept constant regardless of the image dimensions and characters sizes. It is also one of the most important features of the proposed technique that the calculations are based on a simple absolute difference and average process. Nowadays, character recognition systems are mostly used in real time for the security of traffic systems with mobile devices. For this reason, speed factor plays an important role in character recognition techniques using optimization and artificial intelligence systems [26-28]. In the future, it is planned to carry out studies to ensure that the proposed system is

applied to real time systems with higher success rates while maintaining high speed performance.

REFERENCES

- [1] Coşkun A., Horat B., "Mobile electronic system integration placement optimization within Ankara by using genetic algorithms", *Scientific Research and Essays*, 9(16): 716-721, (2014).
- [2] Coşkun A., Ülker Ü., "Development of A Cryptographic Algorithm for National Information Security and Determination of Confidence Against Letter Frequency Analysis", *International Journal of Informatics Technologies*, 6(2): 31-39, (2013).
- [3] Chang S. L., Chen L. S., Chung, Y. C., Chen, S. W., "Automatic license plate recognition", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 5(1): 42-53, (2004).
- [4] Yang C. S., Yang Y. H., "Improved Local binary pattern for real scene optical character recognition", *Pattern Recognition Letters*, 100: 14-21, (2017).
- [5] Shapiro V., Gluhchev G., Dimov D., "Towards a multinational car license plate recognition system", *Machine Vision and Applications*, 17(3): 173-183, (2006).
- [6] Tarigan J., Diedan R., Suryana Y., "Plate Recognition Using Backpropagation Neural Network and Genetic Algorithm", *Procedia Computer Science*, 116: 365-372, (2017).
- [7] Singla S. K., Yadav R. K., "Optical character recognition based speech synthesis system using LabVIEW", *Journal of Applied Research and Technology*, 12(5): 919-926, (2014).
- [8] Phangtrianu M. R., Harefa J., Tanoto D. F., "Comparison between neural network and support vector machine in optical character recognition", *Procedia Computer Science*, 116: 351-357, (2017).
- [9] Kim D. S., Chien S. I., "Automatic car license plate extraction using modified generalized symmetry transform and image warping", *2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings*, 12-16 June, Pusan, 2002-2007, (2001).
- [10] Amit Y., Geman D., Fan X., "A coarse-to-fine strategy for multiclass shape detection", *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 12, 1606-1621, (2004).
- [11] Coşkun A., Bostancı Ü., "Evaluation of the most preferred operating systems on computers in terms of vulnerabilities", *International Journal of Human Sciences*, 13(3): 4545-4564, (2016).
- [12] Coşkun A., Bostancı Ü., "Vulnerability analysis of smart phone and tablet operating systems", *Tehnički vjesnik*, 25(6): 1860-1866, (2018).
- [13] Iyer N., Jayanti S., Lou K., Kalyanaraman Y., Ramani K., "Three-dimensional shape searching: State-of-the-art review and future trends", *Computer-Aided Design*, 37(5): 509-530, (2005).
- [14] Gonzalez R. C., Woods R. E., "Digital Image Processing", *Publishing House of Electronics Industry*, (2002).
- [15] Ankerst M., Kastenmüller G., Kriegel H. P., Seidl T., "3D shape histograms for similarity search and classification

- in spatial databases”, *International Symposium on Spatial Databases*, Berlin, Heidelberg, 207-226, (1999).
- [16] Tangelder J. W., Veltkamp R. C., “A survey of content based 3d shape retrieval methods”, *Proceedings Shape Modeling Applications*, 7-9 June, Genova, 145-156, (2004).
- [17] Choras R. S., “Image feature extraction techniques and their applications for cbir and biometrics systems”, *International Journal of Biology and Biomedical Engineering*, 1(1): 6-16, (2007).
- [18] Kumar G., Bhatia P. K., “A detailed review of feature extraction in image processing systems”, *Fourth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*, 8-9 February, Rohtak, 5-12, (2014).
- [19] Cho M., Kwak S., Schmid C., Ponce J., “Unsupervised object discovery and localization in the wild: part-based matching with bottom-up region proposals”, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 7-12 June, Massachusetts, 1201-1210, (2015).
- [20] Kazhdan M., Funkhouser T., Rusinkiewicz S., “Rotation Invariant Spherical Harmonic Representation of 3D Shape Descriptors”, *In Symposium on Geometry Processing*, 156-164, (2003).
- [21] Chen D. Y., Tian X. P., Shen Y. T., Ouhyoung M. “On Visual Similarity Based 3D Model Retrieval”, *In Computer Graphics Forum*, September, 223-232, (2003).
- [22] Körtgen M., Park G. J., Novotni M., Klein R., “3D Shape Matching with 3D Shape Contexts”. *In The 7th Central European Seminar on Computer Graphics*, 5-17, (2003).
- [23] Daras P., Axenopoulos A., “A 3D Shape Retrieval Framework Supporting Multimodal Queries” *International Journal of Computer Vision*, 89(2-3): 229-247, (2010).
- [24] Huang P., Hilton A., Starck J., “Shape Similarity for 3D Video Sequences of People”, *International Journal of Computer Vision*, 89(2-3): 362-381, (2010).
- [25] Otsu N., “A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1): 62-66, (1979).
- [26] Coşkun A., “Simulated annealing algorithm and layout optimization for the contents of a web page”. *3rd International Conference on Electronics Computer Technology*, 353-357, (2011).
- [27] Coşkun A., “Optimization of a Mini-Golf Game using the Genetic Algorithm”, *Electronics And Electrical Engineering*, 109(3): 97-100, (2011).
- [28] Coşkun A., Arıcı N., “Defining the Possible Molecular Structure of the Drug to Be Penetrated through Skin Layers Using Genetic Algorithm”, *Gazi University Journal of Science*, 24 (2): 36-41, (2014).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Experimental verification of cell shape-collapse relationships in metallic foams by photoelasticity method

Metalik köpüklerin hücre biçimi-çökme ilişkisinin fotoelastisite metodu ile deneysel olarak doğrulanması

Yazar(lar) (Author(s)): Ersin BAHCECI¹, Yusuf OZCATALBAS²

ORCID¹: 0000-0002-7719-6051

ORCID²: 0000-0002-4256-8492

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bahceci E. and Ozcatalbas Y., "Experimental verification of cell shape-collapse relationships in metallic foams by photoelasticity method", *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1101-1110, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.490993

Experimental Verification of Cell Shape-Collapse Relationships in Metallic Foams by Photoelasticity Method

Araştırma Makalesi / Research Article

Ersin BAHCECI^{*}, Yusuf OZCATALBAS²

¹İskenderun Technical University, Faculty of Engineering and Natural Science, Department of Metallurgical and Materials Engineering 31200-İskenderun/Hatay, Turkey

²University of Gazi, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering 06500-Besevler/Ankara, Turkey

(Geliş/Received : 30.11.2018 ; Kabul/Accepted : 11.02.2019)

ABSTRACT

In the present study, the effect of cell morphology on mechanical properties in metallic foams with Al based closed cells was examined. AlSi8Mg0.8 alloyed metallic foam materials were produced by the Powder Metallurgy (PM) method. The elastic stresses and their distributions which were created by the compression load in the metallic foams, producing in similar density and different cell sizes were investigated by the photoelasticity method. The fracture and collapse mechanisms of the foaming materials, having the same density but different cell size and shape factor, exhibited discrepancy as well. The elastic stress concentrations and their distributions that were created by compression at the cell walls could be determined by the photoelasticity method. It was detected that the fringe orders in the photoelasticity images provided important and accurate information about the stress concentration areas at the foam walls. It was specified that the collapse at the end of the compression tests started mostly at these areas.

Keywords: Metallic foam, cell morphology, photoelasticity, stress distribution, collapse.

Metalik Köpüklerin Hücre Biçimi-Çökme İlişkisinin Fotoelastisite Metodu ile Deneysel Olarak Doğrulanması

ÖZ

Bu çalışmada, Al esaslı kapalı hücreli metalik köpüklerdeki hücre morfolojisinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. AlSi8Mg0.8 alaşımlı metalik köpük malzemeler Toz Metalurjisi (PM) yöntemiyle üretilmiştir. Benzer yoğunlukta ve farklı hücre boyutlarındaki metalik köpüklerde basma yükü ile oluşturulan elastik gerilmeler ve bunların dağılımları fotoelastisite yöntemi ile incelenmiştir. Aynı yoğunlukta fakat farklı hücre boyutu ve şekil faktörüne sahip köpük malzemelerin kırılma ve çökme mekanizmaları da farklılık göstermiştir. Hücre duvarlarında basma ile oluşturulan elastik gerilme konsantrasyonları ve dağılımları fotoelastisite yöntemiyle belirlenebilmiştir. Fotoelastisite görüntülerdeki renk saçaklarının (fringe orders) köpük duvarlarındaki gerilme yığılma bölgeleri hakkında önemli ve doğruluğu yüksek bilgi verdiği tespit edilmiştir. Basma deneyleri sonunda çökmenin çoğunlukla bu bölgelerde başladığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Metalik köpük, hücre morfolojisi, fotoelastisite, gerilim dağılımı, çökme.

1. INTRODUCTION

Foam materials have attracted attention in recent years as materials used in various engineering practices. They have the ability to be considerably deformed by constant stress [1, 2]. Although intensive researches continue on the metallic foams, the effect of cell structure on the foam characteristics could not be explained clearly. The most important reason is the cell structure which cannot be controlled entirely during the production of foam

materials. Therefore, the cell structure shows a difference in the foam materials having the same chemical composition and same mechanical properties. It is known that the relative density of the cell wall directly affect the mechanical properties of the foams when compared to their thickness [3]. Elasticity modules, densities and cell morphology of the foams should be defined to find usability of lots of industrial application.

There are publications in the related literature about cell fractures of metallic foams and calculations of their strength [4, 5]. With mechanical tests, performing tensile-compression operation strength can be determined [4, 6, 7]. It is used in micromechanical models in predicting cell breakage [8]. In addition, non-

**Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-posta : ersin.bahceci@iste.edu.tr*

destructive, mathematical modeling has been developed in computational and principal component analysis techniques using cell shapes [8-10]. Also, work has already been done to give an idea about where to collapse and how breaks will start [11].

In this study, analyzability of effect of cell morphology of metallic foam with closed cell, which is produced by powder metallurgy method, on the stresses occurring on cell walls and mechanical properties of the foam was investigated using photoelasticity method. This method was used at the first time for Aluminum foams in the present study. Photoelasticity is the non-destructive stress measuring technique commonly used for measuring stresses through unit deformations on the surface during static or dynamic tests conducted on a piece or a structure. In this method, firstly the test piece is coated with a special resin susceptible to unit deformation. Afterwards, test or service loads are applied on the piece. Coating is illuminated through the polarized light coming from the polariscope. Colors shown on the coating with the help of the polariscope demonstrate the distribution of stresses and high stress areas. Color

changes are recorded through continuous recording [12, 13]. The greatest advantage of this method is the capability to measure the elastic stresses on industrial parts under service conditions without the need for creating a model. Elastic deformations and their corresponding stresses can be calculated according to various colors shown on the surface examined by optical devices [13, 14].

2. EXPERIMENTAL STUDIES

2.1. Material and Method

%8Si+%0.8Mg+%1.2 TiH₂ (by weight) and the remaining Al powder % were mixed in Turbula and pressed in room temperature under 300 MPa pressure and this way the block samples were obtained (Figure 1). The properties of the powder used in the sample production rates are given in Table 1. After sintering block samples at 500 °C (15 minutes) they were extruded at 400 °C. Extruded sample was rolled gradually at 400 °C and plate shaped preform materials (that can be foamed) were produced.

Table 1. Production and properties of the powder used in the sample rates.

| Material | Al | Si | Mg | TiH ₂ | Alloy |
|------------------------------------|-----------|------|-------|------------------|-------|
| Chemical composition (% by weight) | Remainder | 8 | 0,8 | 1,2 | - |
| Purity (%) | 99,9 | 99,9 | 99,95 | - | - |
| Grain size (µm) | <160 | <20 | <150 | <45 | - |
| Dissociation temperature (°C) | - | - | - | 480-570 | - |
| Melting point (°C) | 660 | 1414 | 650 | - | 632 |

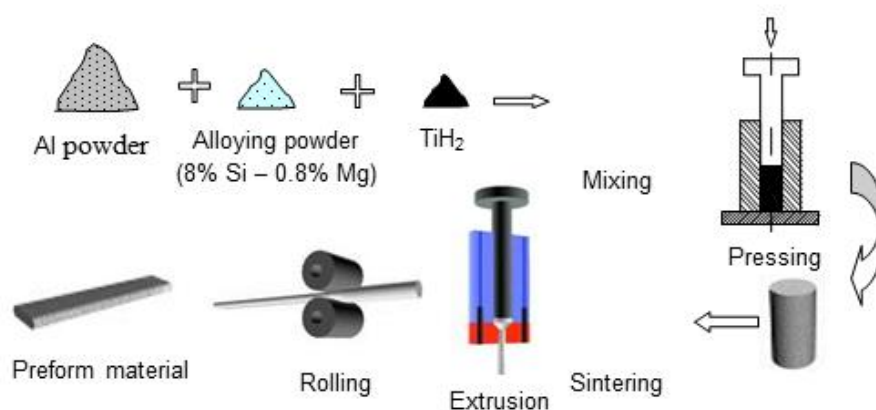


Figure 1. Preform foam material processing steps.

Theoretical density of the block samples produced was calculated as 2.68 g/cm^3 . The density increased up to 2.65 g/cm^3 after the deformation caused by the hot extrusion applied to the sintered material and the density reaching up to 99% was achieved. The maximum density achieved with the rolling process after the extrusion was 99.3%.

Figure 2 illustrates SEM image of the extruded sample. It was seen that light grey particles in EDS analysis were TiH_2 ; and black particles were Si. Certain circled zones were rich in Mg. It is thought that black particles in these zones shown in Al matrix involved the Mg particles decomposed and Mg_2Si precipitates during the extrusion process. It was observed that the deformation processes did not have any significant effect on homogeneous dispersion of TiH_2 and Si particles but the deformation texture became more explicit with especially the rolling process (Figure 3) [15].

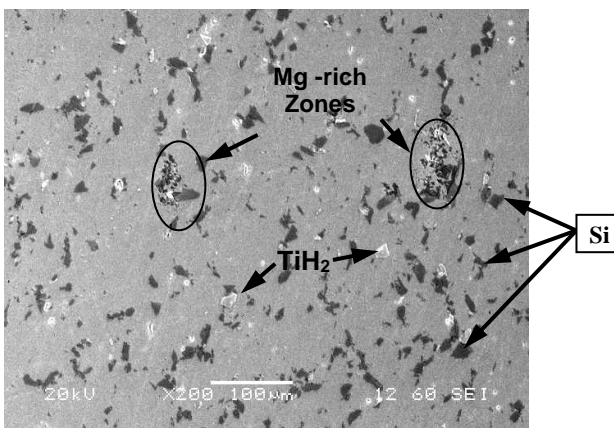


Figure 2. Microstructure of the extruded sample

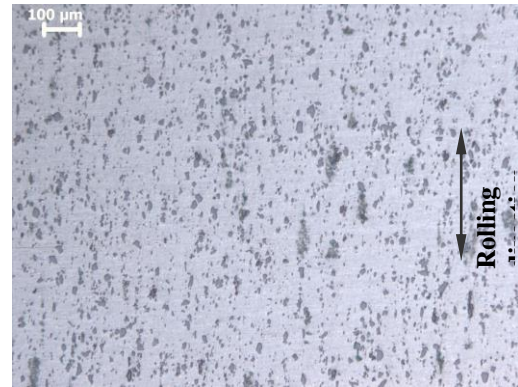


Figure 3. Microstructure of rolled sample.

After being kept at the foaming temperature of $720 \text{ }^\circ\text{C}$ for about 15 minutes, the metallic foam which filled the mould cavity was taken with the mould out of the furnace and left for cooling in the circulating air. At the end of the process, block foam samples and photoelasticity test samples (Figure 4) were prepared. In the present study, the foaming mould that has high heat transfer coefficient was used in order to provide a heat transfer between the Al foam and the mould surface [16].

Figure 4 illustrates block foam samples produced with the size of $30 \times 25 \times 150 \text{ mm}$ and samples prepared for photoelasticity experiment. Block foam samples were cut into sizes of $30 \times 25 \times 25 \text{ mm}$, their open surfaces were coated with resin coating material and their photo-stress images were taken by using polariscope (Figure 4.b). Reflective adhesive materials were coated the surface as thin as possible.

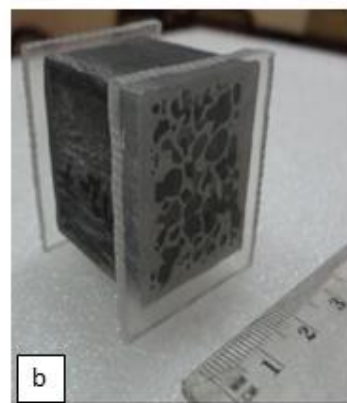
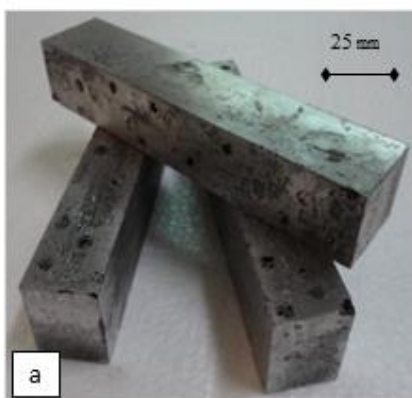


Figure 4. a) Foam blocks and b) photoelasticity sample.

Photoelasticity test apparatus is shown in Figure 5.a-b. For this purpose a compression press of 10 kN capacity was used. The applied loads were measured with a load cell connected to data logger.

In the determination of cell shape factor and size, image analysis was made from the scanning pictures of foam samples. Cell size was determined by the two dimensional cell diameter calculation method.

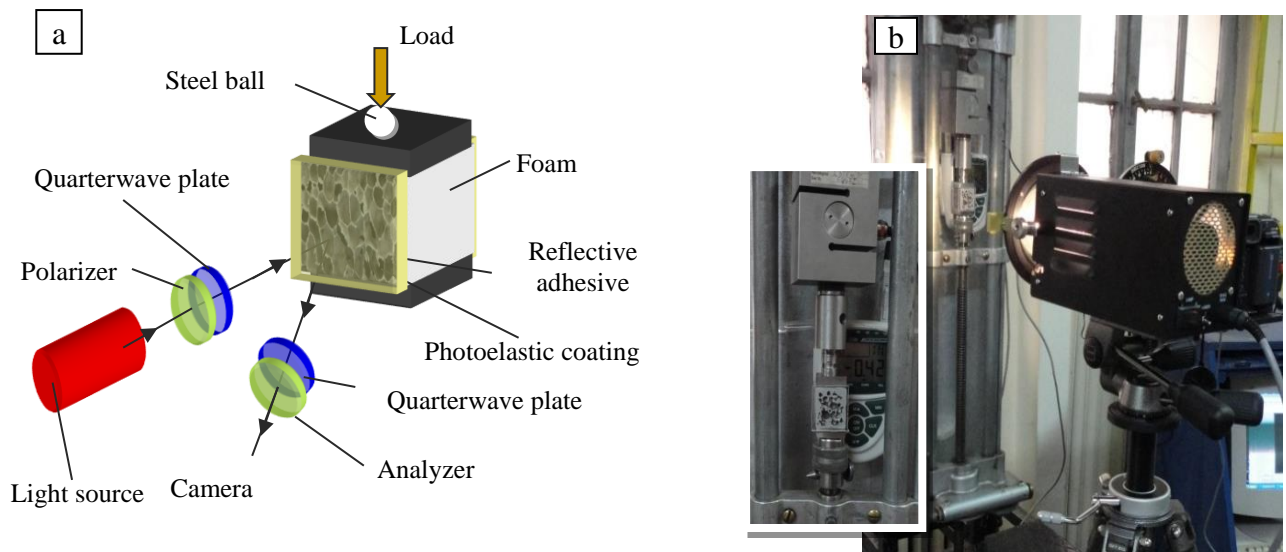


Figure 5. a) Schematic illustration of the experimental setup and b) Photoelasticity experimental setup.

2.2. Calculations of Elasticity Modules, Density and Cell morphology

The elasticity modules and densities with respect to the regular hexagon (Honey comb) closed cell model approach were determined using Gibson and Ashby (1997)' method. The equation is given in Eq. 1 [17, 18].

$$\frac{E^*}{E_s} = \phi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + (1-\phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \quad 1$$

Where E_s and ρ_s are the elastic modulus and mass density of solid cell wall of the foam material, ϕ is the volume fraction of solid contained in the cell edges while E^* and ρ^* are the elastic modulus, plateau stress and mass density of foam. The mechanical properties of aluminium foam of closed cell depend mainly on the uniformity, greatness, distribution and relative density of cell structures [19]. Raj and Daniel (2008), stated that there was a deficiency in the model of regular hexagon closed cell foam elasticity module given by Gibson & Ashby (1997) and made Regression analysis. Gibson and Ashby model have two parts. $(\rho^* / \rho_s)^2$ and (ρ^* / ρ_s) represent the cell wall and cell side effects respectively (Eq 1).

$$\text{Shape factor}(F) = \frac{4\pi}{n} \sum_i^n \frac{a_i}{l_i^2} \quad 2$$

Where, n = total number of cells, i = cell number, a_i = cell area and l_i = cell-boundary length. The shape factor described the deviation of the cell geometry foam a circle with $F= 1$. It is found that F decreases much more with decreasing foam density than expected from the transition of spherical to polygonal cells. Ideally the foam structure to the shape factor is regarded to be approximately 0.9 [20].

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Foam material

Microstructure pictures of the cell walls of the material after the foaming are given in Figure 6. Co-axial α -Al dendrites phase, Al-Si eutectic phase and primary Si phase were observed on the figures. It was seen that the primary Si was still in the structure. It meant that Si could not change the structure as eutectic because it did not find enough time and the solidification process was too fast depending on the faster heat loss. The Si phase was generally solidified in plate-like cell walls [21]. The structure showed great similarity with the literature finding [22-24].

It was shown that the strain localization in the latter stages of deformation was present in both foam types: Broad deformation bands caused a collective collapse of cell walls were observed in pure Al foam. Whereas characteristic brittle fracture of the AlSi12 foam matrix resulted in distinctive, highly localized bands [25].

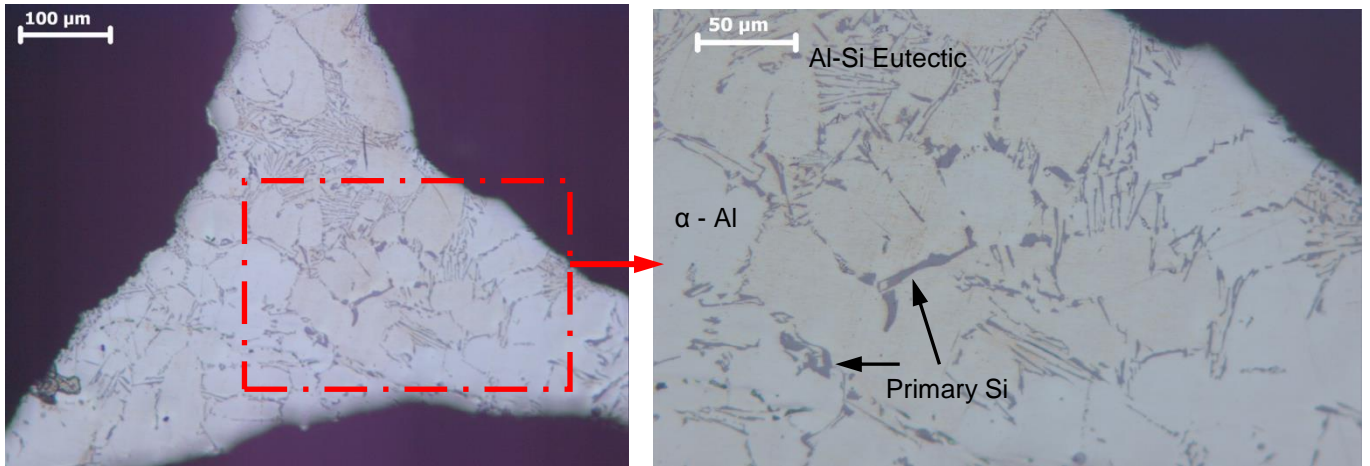


Figure 6. Foam plateau and cell wall microstructure (5% etching).

The general characteristics of foam materials that were produced in three different density group and different average cell sizes are shown in Table 2. In general, nearly spheroidal and uniform cell distribution was observed. The highest 0.78 shape factor value was reached. Cell

wall breakups and cell extinctions were seen in the areas in contact with the mould surface. Metallic foams with uniform cell size and distribution were produced having narrowing standard deviation interval with the decreasing average cell dimension.

Table 2. General physical and geometrical characteristics of foam materials.

| Average Density (g/cm ³) | Foam material | Density - ρ (g/cm ³) | Average cell size -d (mm) | Cell standard deviation (δ) | Shape factor (F) |
|--------------------------------------|---------------|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|------------------|
| MFI- 0.62 | MF1 | 0.62 | 2.9 | 0.84 | 0.71 |
| | MF2 | 0.60 | 3.3 | 0.92 | 0.72 |
| | MF3 | 0.65 | 3.6 | 1.34 | 0.74 |
| MFII -0.70 | MF4 | 0.70 | 3.1 | 0.71 | 0.78 |

The metallic foam sample produced an average cell size, standard deviation intervals and distributions is shown to Figure 7. They were produced standard deviation range

narrowed uniform cell size and distribution, increased number of cells and decreasing average cell size.

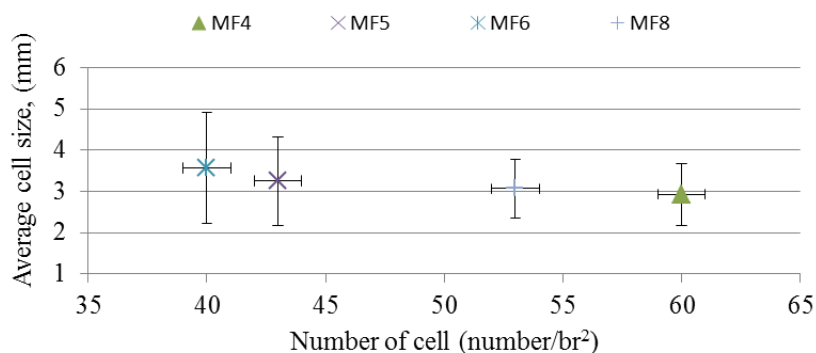


Figure 7. Foam cell sizes and their distribution.

3.2. Photoelasticity test results

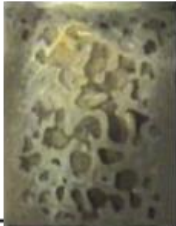
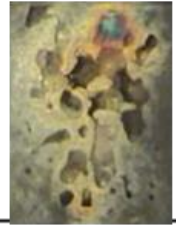

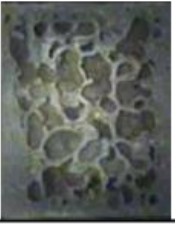



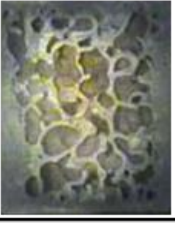



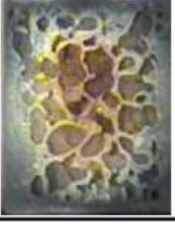



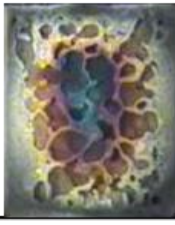








Significant data, on images taken using Vishay PALC 3 Photostress program, with high accuracy rates were

determined on the elastic stress accumulation areas and degrees of foam materials [21]. On photoelastic images, the color fringe orders creating color transitions were obtained with the increase of load (and therefore stress).

It was observed that different tones of the same colors (color degree) increased in direct proportion to the increasing stress.

In the photoelastic images, fringe orders that create colour passages with the increase of load were obtained. It was specified that the fringe orders increased directly with the increasing of load (Table 3).

Table 3. Load-Photoelasticity changes with respect to foam type.

| | Elastic module (GPa) | | | |
|----------------|---|---|--|---|
| Gibson & Ashby | 6.7 | 6.5 | 7.1 | 11.8 |
| Load (kN) | MF1 | MF2 | MF3 | MF4 |
| 0.25 |  |  |  |  |
| 0.50 |  |  |  |  |
| 0.75 |  |  |  |  |
| 1.00 |  |  |  |  |
| 1.25 |  |  |  |  |
| 1.50 |  |  |  |  |

10 mm



During the compression tests, created elastic stress on cell walls was measured within elastic limits by photoelasticity method. Up to the yield stress, there was no significant effect on the mechanical failure of the adhesive material holding the photoelastic coatings (lids) on both sides. The function of the adhesive material is to transfer the elastic strain in the cell walls to the lids. However, it was observed that the strength of the cell walls was affected by the photoelastic coatings after the yield strength. For this reason, the lids were removed by means of a non-destructive technique and also the compression process was continued.

During 0.25 kN loading no colour change was observed in MF4 material whereas in the MF2 material formation

of fringe orders was seen (stress concentration area) (Table 3). In the MF4 material with the increasing load the fringe orders were at the first degree at 1 kN whereas the equivalent image to this image on the MF2 material was observed at 0.25 kN load and on a narrower area. Similar relation was also seen in the MF3 and MF1 materials. The elastic loadings which were applied to metallic foams caused stress concentrations according to the cell shapes in the structure. Depending on the increase of the force lines, the stress also increased proportionally. Regular colour outlook meant regularly distributed stress areas [26]. In the foam materials, the significant photoelastic images were obtained according to the classification of the elastic module values of Gibson model.

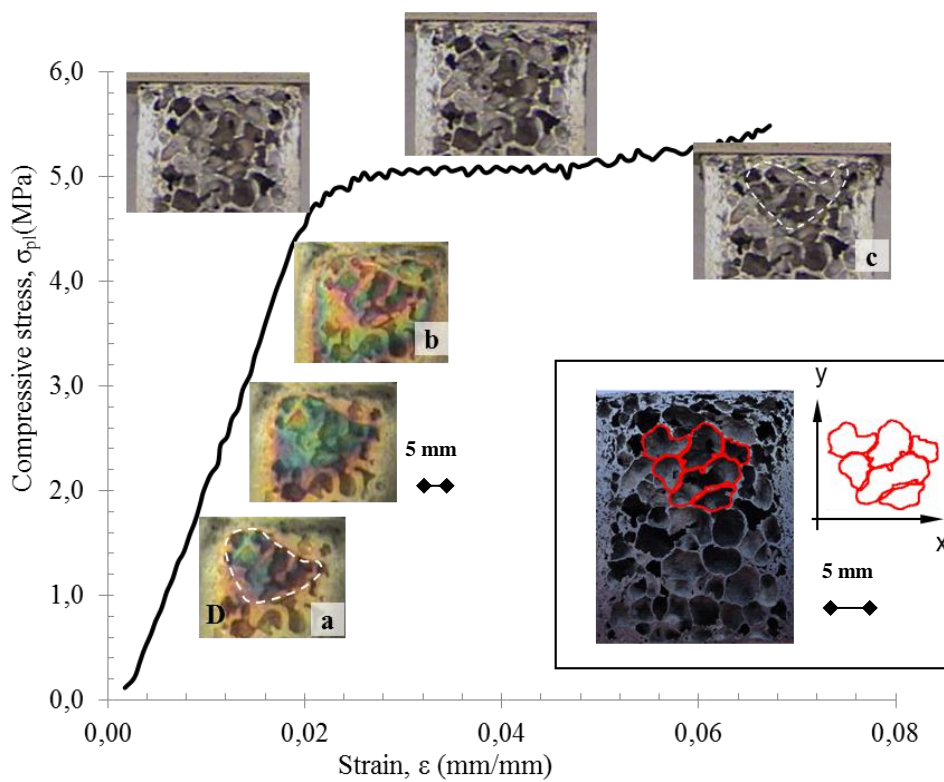


Figure 8. The stress-strain curve of MF1 foam a-b)Photoelastic image, c) Collapsing deformation in compression test.

Figure 8.a shows that the stress concentration was more intensive (at the area D of the photoelastic image of MF1). In Figure 8.c, it was observed that firstly the plateau and walls were collapsed as expected [27]. It was

specified that as the stress concentration image was being observed on the top areas of foam, the fringe orders proceeded towards the bottom areas of foam with the increase of the load (Figure 8.b).

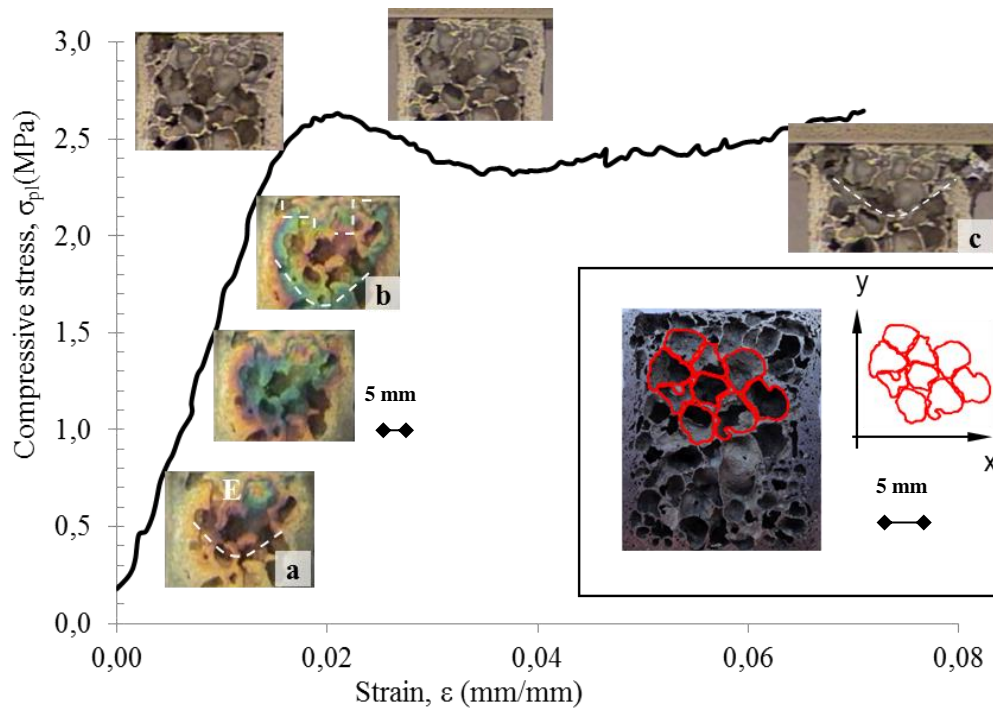


Figure 9. The stress-strain curve of MF2 foam a-b) Photoelastic image, c) Collapsing deformation in compression test.

A more intense stress accumulation was observed on the area marked with E on the photoelastic image on MF2 foam sample (Figure 9.a). The collapse was anticipated to occur on this area because of the small area and also close to foam piece's upper part. The stress accumulation occurring on the plateau area on the upper part of the big cell in the E area seen on Figure 9.c (with the decrease of

the area affected by the load) caused wedge-shaped collapses on both sides with an approximate angle of 45o in the direction that the load was applied. It was determined that the beginning areas of the collapse were the same with stress areas obtained on the photoelastic image within elastic limits.

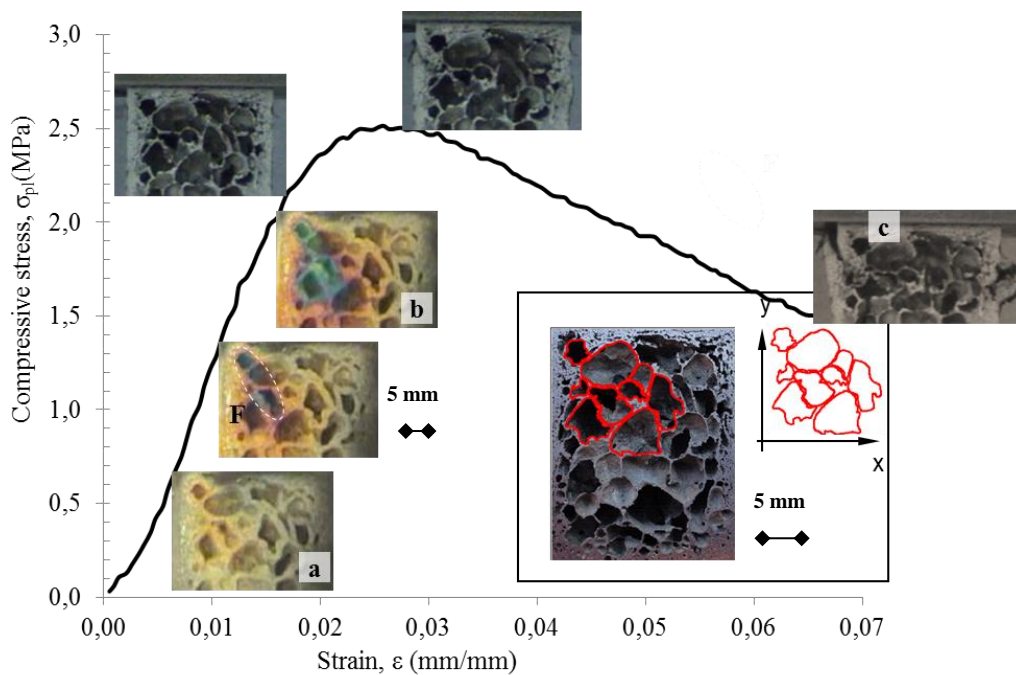


Figure 10. The stress-strain curve of MF3 foam a-b) Photoelastic image, c) Collapsing deformation in compression test.

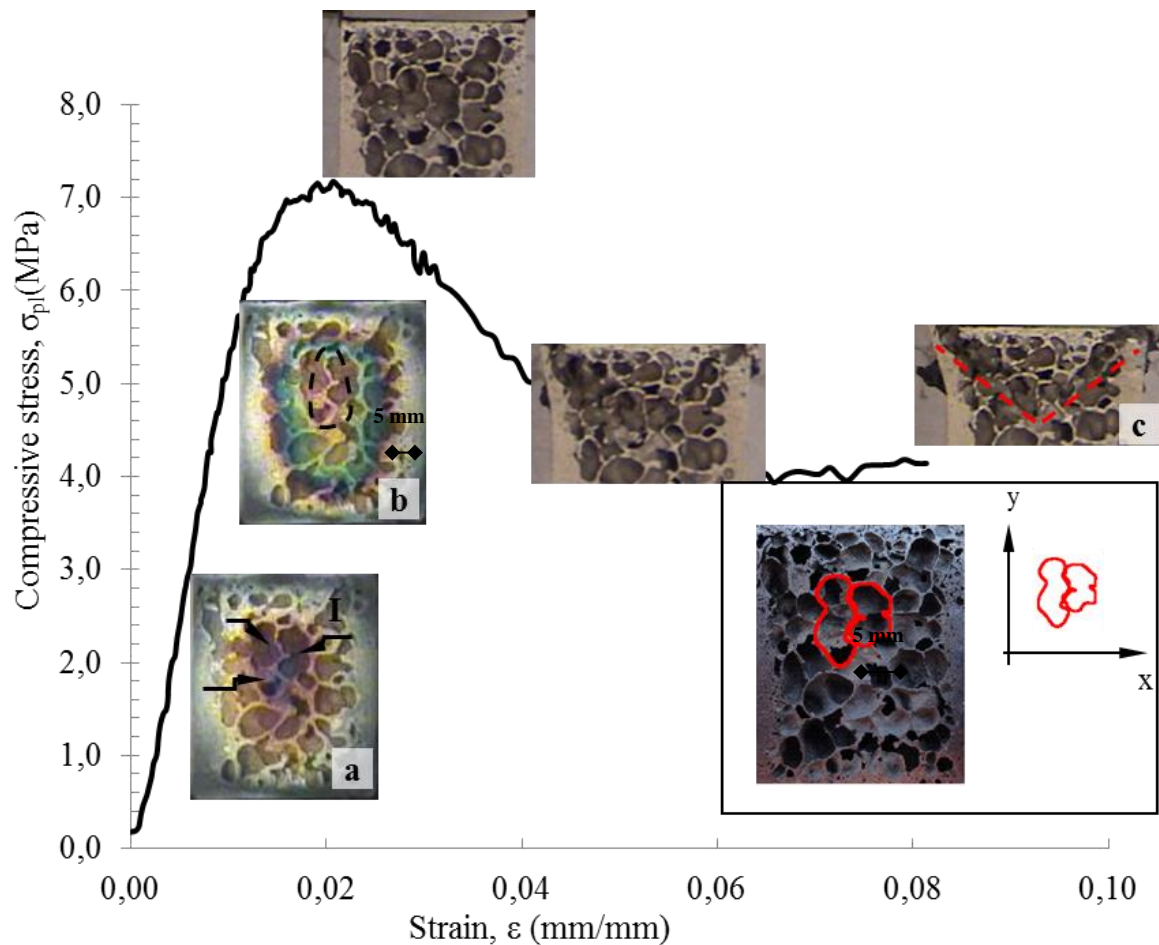


Figure 11. The stress-strain curve of MF4 foam a-b) Photoelastic image, c) Collapsing deformation in compression test.

The photoelastic image created on the MF3 foam material is given in Figure 10.a. It was seen that the stress was concentrated on the area shown as F. During the compression test it was observed that this stress area joined the first fracturing process and was realized with the deformation of cells shown in F (Figure 10.b).

It was observed on photoelastic images of MF4 foam material that stress was intense on the plateau area marked with I arrows (Figure 11). Elasticity module (E^*) and yield stress (σ_{pl}) of the foam material vary depending on the density of the foam material, cell size and distribution [17, 20]. It was observed on MF4 foam material that since thickness of cell walls and the intensity in that area were limited, elastic stress areas become centered on these areas. It was also determined on compression test process images that collapses generally started and fracture process continued on these areas. (Figure 11.c).

6. CONCLUSION

- Metallic foam production of AlSi8Mg0.8 alloy was carried out in density of $0.62 - 0.70 \text{ g/cm}^3$ and different cell sizes by powder metallurgy route.

- Alpha Al, Al-Si-eutectic and primary Si phases were seen on the microstructure of the produced metallic foam cell walls.
- Satisfactory evidences about relationship between stress concentration regions and cell shapes of metallic foams under compression loads were obtained by means of photoelasticity method.
- Formation of cell plateau collapse and cell wall fractures were observed at the intensive stresses regions determined by this method with the compression effect. Therefore, the photoelasticity method could be used to have preliminary information on the mechanical behaviour of metallic foam materials under loads.
- In the metallic foam materials, significant photoelastic image is obtained as the elastic module values increased (with respect to the Gibson model) with the change of fringe orders.
- The overall results were shown that the behaviour (collapse, breakage, etc.) of porous structures under stress in the cell walls can be predicted by using the photoelastic method.

ACKNOWLEDGEMENT

Authors thank to Gazi University providing support as BAP project.

REFERENCES

- [1] Hanssen, A.G., Langseth, M. and Hopperstad, O. S., “Static and Dynamic Crushing of Circular Aluminium Extrusions with Aluminium Foam Filler”, *Int. J. of Impact Eng.* 24(5):475-507, (2000).
- [2] Ruan, D., Lu, G., Chen, F.L., Siores, E. “Compressive Behaviour Of Aluminium Foams at Low And Medium Strain Rates”, *Composite Structures*, 57, 331–336, (2002).
- [3] Yi Y., Zheng X., Fu Z., Wang C., Xu X., and Tan X., “Multi-Scale Modeling for Predicting the Stiffness and Strength of Hollow-Structured Metal Foams with Structural Hierarchy”, *MDPI Materials*, 11(380): 1-12, (2018).
- [4] Jeon I., Asahina T., “The effect of structural defects on the compressive behavior of closed-cell Al foam”, *Acta Materialia*. 53(12): 3415-3423, (2005).
- [5] Jeon I., Katou K., Sonoda T., Asahina T., Kanga Ki-Ju., “Cell wall mechanical properties of closed-cell Al foam”, *Mechanics of Materials*. 41(1): 60-73, (2009).
- [6] Zhihua W., Hongwei M., Longmao Z., Guitong Y., “Studies on the dynamic compressive properties of open-cell aluminum alloy foams”, *Scripta Materialia*. 54(1): 83-87, (2006).
- [7] Tan P. J., Harrigan J. J., Reid S. R., “Inertia effects in uniaxial dynamic compression of a closed cell aluminium alloy foam”, *Materials Science and Technology*, 18(5): 480-488, (2013).
- [8] Marsavina L., Kováčik J., Linul E., “Experimental validation of micromechanical models for brittle aluminium alloy foam”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 83: 11-18, (2016).
- [9] Sevostianov I., Kováčik J., Šimančík F., “Elastic and electric properties of closed-cell aluminum foams: Cross-property connection”, *Materials Science and Engineering: A*, 420(1–2): 87-99, (2006).
- [10] Mines R. A. W., “On the Characterisation of Foam and Micro-lattice Materials used in Sandwich Construction”, *Strain An International Journal For Experimental Mechanics*. 44(1): 1-83, (2008).
- [11] Singh R., Lee P. D., Lindley T. C., Kohlhauser C., Hellmich C., Bram M., Imwinkelried T., Dashwood R. J., “Characterization of the deformation behavior of intermediate porosity interconnected Ti foams using micro-computed tomography and direct finite element modeling”, *Acta Biomaterialia*, 6(6): 2342-2351, (2010).
- [12] Vishay Tech Note TN-702-2, “Introduction to Stress Analysis the PhotoStress Method”, 1–13, (2011).
- [13] Ozer, A., Ozcatalbas, Y., “Measuring the residual/permanent stresses by using hole-drilling method and calibration of rosette strain-gauges”, *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.* 26(3): 657-666, (2011).
- [14] Cevik, B., Ozer, A. ve Ozcatalbas, Y., “Analysis of Stress Generated in Fillet Welds by Using Photoelasticity Method”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 409-414, (2011).
- [15] Bahceci, E. and Ozcatalbas, Y., “Microstructural Characterisation Of The AlSiMg Alloy Metallic Foams Produced With P/M Method”, *IN-TECH*, 459-463 (2013).
- [16] Guarino S., Di Ilio G., and Venettacci S., “Influence of Thermal Contact Resistance of Aluminum Foams in Forced Convection: Experimental Analysis”, *MDPI Materials*, 10: 1-14, (2017).
- [17] Gibson, L. J. and Ashby, M. F., “Cellular Solids: Structure and Properties-Second edition”, *Cambridge University Press*, 175-308, (1997).
- [18] Kim, A., Hasan, M.A., Nahm, S.H. and Jun, Y.D., “Compressive Mechanical Properties of Closed Cell Al-Si-Cu-Mg Alloy Foams”, *Int. conference on mechanical engineering*, 1-6, (2003).
- [19] Raj, R.E. and Daniel, B.S.S., “Structural and Compressive Property Correlation of Closed-Cell Aluminium Foam”, *Journal of Alloys And Compounds*. 467: 550-556, (2008).
- [20] Degischer, H.P. and Kriszt, B., “Handbook of Cellular Metals: Production, Processing and Applications”, *Wiley-VCH. Weinheim*, 1-363, (2002).
- [21] Bahceci, E., “Effect of cell morphology on mechanical properties of closed cell metal foams and usability of photoelasticity method”, *University of Gazi Science Enstitute*, 106-117, (2012).
- [22] Kaufman, J. Gilbert and Rooy Elwin L., “Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications”, *ASM International*, 120, (2004).
- [23] Nafisi S., Ghomashchi R., “Effect of modification during conventional and semi- solid metal processing of A356 Al-Si Alloy”, *Science and Engineering, A* 415: 273–285, (2006).
- [24] Apelian, D., “Aluminum Cast Alloys: Enabling Tools for Improved Performance”, *North American Die Casting Association*, 6-17, (2009).
- [25] Kádár C., Máthi K., Knapék M., and Chmelík F., “The Effect of Matrix Composition on the Deformation and Failure Mechanisms in Metal Matrix Syntactic Foams during Compression”, *MDPI Materials*, 10(196): 1-10, (2017).
- [26] Ozkir, S.E., “Photoelastic Stress Analysis of Fixed Restorations over Straight and Inclined Implants with Different Macro-Designs”, *Ankara University Graduate School Of Health Sciences*, 40-47, (2007).
- [27] Aly M. S., “Behavior of closed cell aluminium foams upon compressive testing at elevated temperatures: Experimental results”, *Materials Letters*, 61(14–15): 3138-3141, (2007).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



A fuzzy MCDM approach to determine the most influential logistic factors

En etkili lojistik faktörleri belirlemek için bulanık bir ÇKKV yaklaşımı

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet Burak ŞENOL¹, Aylin ADEM², Metin DAĞDEVİREN³

ORCID¹: 0000-0002-6418-2486

ORCID²: 0000-0003-4820-6684

ORCID³: 0000-0003-2121-5978

Önemli Not : Aylin ADEM' in soy ismi Cilt 22 Sayı 3'de sehven Aylin ERDEM yazıldığı için söz konusu makale bu sayıda tekrar yayınlanmıştır.

Important Note: Since Aylin ADEM's surname was mistakenly written as Aylin ERDEM in previous issue (Vol. 22 Issue 3) of the journal, this article re-published in this issue.

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Şenol M.B., Adem A. and Dağdeviren M., "A fuzzy MCDM approach to determine the most influential logistic factors", *Politeknik Dergisi*, 22(3): 793-800, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.586041

En Etkili Lojistik Faktörleri Belirlemek için Bulanık Bir ÇKKV Yaklaşımı**

Araştırma Makalesi / Research Article

Mehmet Burak ŞENOL*, Aylin ADEM, Metin DAĞDEVİREN

Department of Industrial Engineering, Gazi University

(Geliş/Received : 03.04.2018 ; Kabul/Accepted : 17.06.2018)

ÖZ

Malzeme yönetimi sanatı; lojistik işletmelerin etkinlik ve verimliliğinde önemli bir rol oynar. En etkili lojistik faktörleri belirlemek çok önemlidir; çünkü lojistik maliyetler toplam işletme maliyetinin %30'una tekabül etmektedir. Bu çalışmada lojistik firmaların başarısını etkileyen maliyet, hız, güvenilirlik, müşteri memnuniyeti, dağıtım kanalı, firma imajı, çevre dostu olma ve teknolojik yeniliklere açık olma gibi faktörler incelenmiş ve sıralanmıştır. Faktörleri sıralamak için Pisagor Bulanık (PF) kümeleri, üçgensel bulanık sayılar ve Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) temelinde üç farklı yaklaşım önerilmiştir. Literatüre yeni girmesine rağmen, Pisagor bulanık kümeleri belirsizlik hesaplamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. AHP, F-AHP ve PF-AHP yöntemleri uygulanarak en etkili üç lojistik faktörü maliyet, hız ve güvenilirlik olarak belirlenmiştir, ancak faktör ağırlıkları farklıdır. AHP, F-AHP ve PF-AHP sonuçları arasındaki farklılıkların değerlendirmelerin kesin değerlerle yapılması, dilsel ifadelerin kullanılması ya da üyelik derecesi koşulunun sağlanıp sağlanamamasından kaynaklandığını düşünmekteyiz. Bunun yanında Türkiye'deki ilk 10 lojistik firma bu kriterlere göre puanlanarak sıralanmıştır. Lojistik firmaların faktörlere göre yapılan sıralarının ekonomik büyüklüklerinden farklı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Lojistik, pisagor bulanık sayılar, AHP, bulanık-AHP, ÇKKV.

A Fuzzy MCDM Approach to Determine the Most Influential Logistic Factors

ABSTRACT

The art of managing materials; logistics play a crucial role in efficiency and productivity of companies. It is very significant to determine most influential logistic factors since logistic costs account for 30% of total company costs. The factors affecting success of logistic enterprises such as cost, speed, reliability, customer satisfaction, distribution channel, company image, environmental friendliness and technological innovations are investigated and ranked in this study. Three different approaches based on Pythagorean Fuzzy sets, triangular fuzzy numbers and Analytic Hierarchy Process is offered for ranking these factors. Although it has been introduced to literature recently, the pythagorean fuzzy sets are widely employed in calculating uncertainty. The three most influential logistic factors are revealed as cost, speed and reliability, respectively by employing AHP, Fuzzy AHP and Pythagorean Fuzzy AHP, however factor weights are different. We think that the differences with in the AHP, F-AHP and PF-AHP results may stem from expressing evaluations in exact values, linguistic terms or in some cases it may be related to fulfilling the condition of membership and non-membership. Furthermore, top 10 logistic firms in Turkey are scored and ranked to these factors. Logistics, Pythagorean fuzzy sets, AHP, Fuzzy AHP, MCDM.

Keywords: Logistics, pythagorean fuzzy sets, AHP, fuzzy AHP.

1. INTRODUCTION

Logistics provide the efficient movement of supplies to the customers and plays a vital role in satisfying customer demands in time and at the lowest possible cost. In logistics, transportation costs, occupying more than one-third of logistic costs, influence the efficiency of whole production processes from manufacturing to delivery to final consumers and returns.

A good transportation system brings benefits to service quality and company competitiveness. Logistic costs account for 30% of the total company costs. A

management perspective on logistics activities is required [1]. For that reason, it is very significant to determine most influential logistic factors in company's supply chain operations. Here, Multi Criteria Decision Making (MCDM) methods based on Pythagorean Fuzzy (PF) sets, triangular fuzzy numbers and Analytic Hierarchy Process (AHP) can be easily applied as a decision support tool to rank these factors and determine the most influential one. Utilization of PF sets in MCDM is not quite new. However, it is difficult to find a research in the literature focused on logistic factors using PF numbers, triangular fuzzy numbers and AHP. Kumru and Kumru [2] employed an AHP model in selecting the most suitable way of transportation between two given locations in Turkey for a logistic company.

*Sorumlu yazar (Corresponding Author)

e-posta : mburaksenol@gazi.edu.tr

** **Önemli Not** : Aylin ADEM' in soy ismi Cilt 22 Sayı 3'de sehven Aylin ERDEM yazıldığı için söz konusu makale bu sayıda tekrar yayınlanmıştır.

Logistic activities have always enlisted interest of researchers and firms in order to improve services and reduce costs. Different approaches were offered for evaluating performance of logistic activities. Past performance records were frequently used as a single evaluation dimension, but it is not sufficient for a comprehensive evaluation [3-8]. A number of papers were determined significant logistic resources and examined their effects on logistic performance with respect to Resource-Based View (RBV) theory, which believes that the success of logistic activities is based on unique and valuable resources of companies [9-13]. The RBV theory considers company resources in two categories, which are tangible resources, e.g. technology and physical resources and intangible resources, e.g. management expertise, relational and structure resources. However, large number of conflicting criteria had to be considered and analyzed in all of the aforementioned studies. Determining the most influential factors for success of logistics enterprises can be handled as an MCDM problem. Making decisions in the presence of multiple, usually conflicting, logistic criteria and finding the best option from all of the feasible alternatives is only possible with MCDM tools [14].

The purpose of this paper is to present a fuzzy analytical approach for evaluating logistic factors and companies. This paper is one of a kind on considering logistic factors as an MCDM problem which employs pythagorean fuzzy numbers and presents a holistic view. Purpose and originality of the study are explained in this section. We also briefly present the literature here.

The rest of the paper is organized as follows. Methodology of the research is presented in Section-2. AHP, F-AHP and PF sets and PF-AHP steps are briefly explained in this section with general features and basic notions. Section-3 is devoted to evaluation of logistic factors and discussions of results. Illustrative examples for the decision models together with comparative step-by-step analysis are given. The most influential logistic factors are revealed as cost, speed and reliability, respectively. The sequence of factors varies in AHP, F-AHP and PF-AHP results. The conclusions are made in Section 5 and suggestions for future work are explained.

In logistics, main cost is the payments made for the transportation between two points that may be affected by site of the company. Another criterion to be considered for success of logistics is speed related to duration between two sites where materials are transported. Consistently meeting promised delivery times and fulfilling service requirements for shipper's consignments determines the reliability of logistic services. Considering transportation modes, reliability is good for highway and railway and it is related to flexibility [15]. Offering convenient schedules or allowing to non-specific extra pick-up and deliveries, determines the flexibility of transportation modes and logistic enterprises.

Satisfying customer demands in time and at the lowest possible cost is one of the main objectives of logistics. Customer satisfaction is greatly affected by distribution channels, which are highway, railway, waterway, pipeline and airway. They have different advantages as well as disadvantages in terms of reduced cost, increased agility and service. Air quality, reducing greenhouse gas emissions, noise, waste are the issues concerned with environmental friendliness. Due to aforementioned explanations factors such as cost, speed, reliability, customer satisfaction, distribution channel, company image, environmental friendliness, being open-minded to technological innovations (industry 4.0 applications, etc.) are selected for evaluation. In this study a fuzzy MCDM approach based on PF sets, triangular fuzzy numbers and AHP is presented to evaluate logistic factors and rank logistic enterprises.

Yager introduced pythagorean fuzzy sets to the literature, since in some cases, intuitionistic fuzzy sets unable to capture the condition for degrees of membership and non-membership greater than 1 [16]. Pythagorean fuzzy sets are employed in many different applications. Yücesan and Kahraman (2019) employed PF-AHP for risk assessment in hydroelectric power plants [17]. Gül and Ak, (2018) calculated the importance levels of parameters by a 5×5 matrix method with the help of the PF-AHP [18].

İlbarhar et al. (2018), proposed an integrated risk assessment approach which includes Pythagorean Fuzzy Proportional Risk Assessment, Fine Kinney, PF-AHP and a fuzzy inference system [19]. They applied this approach to the risks of an excavation process in a construction yard. Karasan et al (2018) proposed a new PF-AHP for site selection [20]. Mete (2018) stated that pythagorean fuzzy sets cover vagueness in a more suitable way and proposed an FMEA-based AHP-MOORA integrated approach under pythagorean fuzzy sets for assessing occupational risks in a natural gas pipeline construction project [21]. Gül (2018) developed a two-phase approach for risk assessment which includes PF-AHP and Fuzzy VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (F-VIKOR) [22]. Gül (2018) evaluated a gun and rifle barrel external surface oxidation and colouring unit with this method [22]. PF numbers were integrated with various MCDM techniques, e.g. TOPSIS [23-25], VIKOR [26, 27] PROMETHEE [28] and CODAS [29] in the literature.

Table 1. Linguistic Scale [43]

| Linguistic scale for importance | Triangular fuzzy scale |
|-------------------------------------|------------------------|
| Just equal (JE) | (1, 1, 1) |
| Equally important (EI) | (1/2, 1, 3/2) |
| Weakly more important (WMI) | (1, 3/2, 2) |
| Strongly more important (SMI) | (3/2, 2, 5/2) |
| Very strongly more important (VSMI) | (2, 5/2, 3) |
| Absolutely more important (AMI) | (5/2, 3, 7/2) |

2.MATERIAL and METHOD

2.1. AHP and Fuzzy AHP

AHP was developed by Thomas L. Saaty in 1977 to solve complex multi criteria decision making problems [30]. AHP was employed to problems in various areas, such as aviation [31-33], equipment and supplier selection [34-35], energy [36-38], investment [39], facility planning [40] and agriculture [41]. However, decision makers feel more comfortable when they express their evaluation in linguistic terms in place of exact values during decision-makings [42]. Fuzzy numbers can be explained with the confidence interval and are defined over a fuzzy subset of real numbers. In this study, the triangular fuzzy numbers in Table 1 were used during the evaluations [43].

Factor weights were determined by taking geometric means and alpha-cut method was employed for the defuzzification of fuzzy numbers.

2.2. Pythagorean Fuzzy Sets and PF- AHP

Three basic representations for pythagorean membership grades are provided in the related literature [16]. The first representation of PF membership is (a, b) satisfying the conditions that $a \in [0, 1], b \in [0, 1]$ and $a^2 + b^2 \leq 1$.

The second one is the polar coordinates (r, θ) satisfying conditions that $r \in [0, 1]$ and $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$. Finally, last representation of PF membership grade is (r, d) close to the second one satisfying the conditions that $r \in [0, 1], \theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$ and $d = 1 - \frac{2\theta}{\pi}$. Their relationship is that $a^2 + b^2 = r^2, a = r \cos(\theta), b = \sin(\theta)$.

A fuzzy subset having these pythagorean membership grades referred as a PFS by Yager [16].

A PFS is defined as follows.

$$\tilde{P} = \{x, P(\mu_p(x), v_p(x)) | x \in X\}, \tag{1}$$

where the function $\mu_p : X \rightarrow [0, 1]$ defines the degree of membership and $v_p : X \rightarrow [0, 1]$ defines the degree of

non-membership of the element $x \in X$ to P respectively and for every $x \in X$ it holds that

$$0 \leq (\mu_p(x))^2 + (v_p(x))^2 \leq 1 \tag{2}$$

For any PFS and $\tilde{P} \ x \in X, \pi_p(x) = \sqrt{1 - \mu_p^2(x) - v_p^2(x)}$ is called the degree of indeterminacy of x to \tilde{P} .

Given three PFNs $P_1 = P(\mu_{p_1}, v_{p_1}), P_2 = P(\mu_{p_2}, v_{p_2})$ and $P = P(\mu_p, v_p)$

Yager defined the basic operations on them which can be described as follows [16]:

$$P_1 \cup P_2 = P\{(\max\{\mu_{p_1}, \mu_{p_2}\}, \min\{v_{p_1}, v_{p_2}\})\}. \tag{3}$$

$$P_1 \cap P_2 = P\{(\min\{\mu_{p_1}, \mu_{p_2}\}, \max\{v_{p_1}, v_{p_2}\})\}. \tag{4}$$

Some mathematical operators for PFNs are defined as follows.

$$\tilde{P}_1 \oplus \tilde{P}_2 = P\left(\sqrt{\mu_{p_1}^2 + \mu_{p_2}^2 - \mu_{p_1}^2 \mu_{p_2}^2}, v_{p_1}, v_{p_2}\right) \tag{5}$$

$$\tilde{P}_1 \otimes \tilde{P}_2 = P\left(\mu_{p_1}, \mu_{p_2}, \sqrt{v_{p_1}^2 + v_{p_2}^2 - v_{p_1}^2 v_{p_2}^2}\right). \tag{6}$$

$$\lambda \tilde{P} = P\left(\sqrt{1 - (1 - \mu_p^2)^\lambda}, (v_p)^\lambda\right), \lambda \geq 0 \text{ and } \lambda \in R. \tag{7}$$

Zhang and Xu (2014) defined the Euclidean distance between two PFNs as in the following equation [44]:

$$d(\tilde{P}_1, \tilde{P}_2) = \frac{1}{2} \left(|\mu_{p_1}^2 - \mu_{p_2}^2| + |v_{p_1}^2 - v_{p_2}^2| + |\pi_{p_1}^2 - \pi_{p_2}^2| \right) \tag{8}$$

The Taxicab distance between two PFSs is defined by equation below;

$$T(\tilde{P}_1, \tilde{P}_2) = \left(|\mu_{p_1} - \mu_{p_2}| + |v_{p_1} - v_{p_2}| + |\pi_{p_1} - \pi_{p_2}| \right). \tag{9}$$

Let $p_1 = (\mu_1, v_1)$ and $p_2 = (\mu_2, v_2)$ be two Pythagorean fuzzy number and $\rho > 0$. The following operations are presented for Pythagorean fuzzy number [44, 45]

$$\tilde{P}_1 \circ \tilde{P}_2 = P \left(\sqrt{\frac{\mu_1^2 - \mu_2^2}{1 - \mu_2^2}}, \frac{v_1}{v_2} \right) \text{ if } \mu_1 \geq \mu_2, v_1 \leq \min \left\{ v_2 \frac{v_2 \pi_1}{\pi_2} \right\} \quad (10)$$

$$\frac{\tilde{P}_1}{\tilde{P}_2} = \left(\frac{\mu_1}{\mu_2}, \sqrt{\frac{v_1^2 - v_2^2}{1 - v_2^2}} \right) \text{ if } \mu_1 \leq \min \left\{ \mu_2 \frac{\mu_2 \pi_1}{\pi_2} \right\}, v_1 \geq v_2 \cdot (11)$$

Pythagorean fuzzy sets can be defined as the general form of the intuitionistic fuzzy sets in which intuitionistic fuzzy sets cannot handle the ambiguity of data [31].

Definition (1) Let a set X be a universe of discourse. A Pythagorean fuzzy set P is an object having the form [22]:

$P = \{ \langle x, P(\mu_p(x), v_p(x)) \rangle \mid x \in X \}$ where

$\mu_p(x) : X \rightarrow [0, 1]$ degree of membership

$v_p(x) : X \rightarrow [0, 1]$ degree of non-membership

of the element $x \in X$ to P. For every $x \in X$, the following holds: $0 \leq \mu_p(x)^2 + v_p(x)^2 \leq 1$

Steps of PF-AHP: These steps are taken from Gül (2018)'s paper [22]:

Step 1. Pairwise comparison matrix $A = (a_{ik})_{m \times m}$ is determined with respect to the linguistic evaluations of experts using the scale offered by Ilbahar et al [19].

Step 2. The difference matrixes $D = (d_{ik})_{m \times m}$ between the lower and upper values of the membership and non-membership functions are revealed by employing Eq. (12) and (13).

$$d_{ikL} = \mu_{ikL}^2 - v_{ikU}^2 \quad (12)$$

$$d_{ikU} = \mu_{ikU}^2 - v_{ikL}^2 \quad (13)$$

Step 3. The interval multiplicative matrix $S = (s_{ik})_{m \times m}$ is found with respect to Eq.(14) and Eq.(15):

$$S_{ikL} = \sqrt{1000^{d_{ikL}}} \quad (14)$$

$$S_{ikU} = \sqrt{1000^{d_{ikU}}} \quad (15)$$

Step 4. The determinacy value $\tau = (\tau_{ik})_{m \times m}$ is determined with the help of Eq. (16)

$$\tau_{ik} = 1 - (\mu_{ikU}^2 - \mu_{ikL}^2) - (v_{ikU}^2 - v_{ikL}^2) \quad (16)$$

Step 5. The determinacy degrees are multiplied with $S = (s_{ik})_{m \times m}$ matrix weights $T = (t_{ik})_{m \times m}$ using Eq.(17) :

$$t_{ik} = \left(\frac{S_{ikL} + S_{ikU}}{2} \right) * \tau_{ik} \quad (17)$$

Step 6. Each normalized priority weight w_i is calculated by using Eq. 18.

$$w_i = \sum_{k=1}^m t_{ik} / \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m t_{ik} \quad (18)$$

The readers who wants to learn more information about AHP, fuzzy AHP and Pythagorean fuzzy AHP can benefit from [19, 22] respectively.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In this part of the study, evaluation matrices and results of the applied methods are given in Table 2, Table 3 and Table 4 respectively. The criteria handled in this study are cost (C1), speed (C2), reliability (C3), customer satisfaction (C4), distribution channel (C5), company image (C6), environmental friendliness (C7), technological innovations and logistic 4.0 (C8).

The method followed in F-AHP can be briefly defined as employing geometric means of the rows and the alpha-cut method for the defuzzification.

Results of Fuzzy AHP and weightst are presented in Table 2. The most important criterion is revealed to be reliability (C3) with respect to F-AHP results. The sequence of most influential logistic factors to F-AHP is presented in Table 2 as reliability (C3), speed (C2), cost (C1), customer satisfaction (C4), distribution channel (C5), company image (C6), technological innovations and logistic 4.0 (C8) and environmentally friendliness (C7).

Table 2. Results of F-AHP

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | Weights |
|----|---------|-------------|---------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|---------|
| C1 | (1,1,1) | (1/2,1,3/2) | (2/5,1/2,2/3) | (3/2,2,5/2) | (5/2,3,7/2) | (2,5/2,3) | (3/2,2,5/2) | (3/2,2,5/2) | 0,176 |
| C2 | | (1,1,1) | (1/2,1,3/2) | (1,1,1) | (5/2,3,7/2) | (5/2,3,7/2) | (3/2,2,5/2) | (3/2,2,5/2) | 0,181 |
| C3 | | | (1,1,1) | (5/2,3,7/2) | (5/2,3,7/2) | (2/5,1/2,2/3) | (5/2,3,7/2) | (3/2,2,5/2) | 0,192 |
| C4 | | | | (1,1,1) | (1/2,1,3/2) | (1/2,1,3/2) | (3/2,2,5/2) | (3/2,2,5/2) | 0,109 |
| C5 | | | | | (1,1,1) | (3/2,2,5/2) | (3/2,2,5/2) | (3/2,2,5/2) | 0,100 |
| C6 | | | | | | (1,1,1) | (1/2,1,3/2) | (1/2,1,3/2) | 0,091 |
| C7 | | | | | | | (1,1,1) | (1/2,1,3/2) | 0,073 |
| C8 | | | | | | | | (1,1,1) | 0,078 |

The logistic experts prepared PF-AHP decision matrix with respect to Ilbahar's scale [19]. This table is required to employ PF-AHP steps. Pairwise comparisons between the criteria can be seen at the decision Matrix in Table 3, which is generated using the Ilbahar's scale of PF AHP.

The PF-AHP results, which were gained by applying PF-AHP steps described in Section 2, are presented in Table 4. The most important criterion is revealed to be reliability (C3) with respect to PF-AHP results. The sequence of most influential logistic factors to PF-AHP is presented in Table 4 as reliability (C3), speed (C2), cost (C1), customer satisfaction (C4), technological innovations and logistic 4.0 (C8), distribution channel (C5), company image (C6) and environmentally friendliness (C7).

AHP and PF-AHP. Table 5 illustrates the comparative results of three applied methods; e.g. AHP, F-AHP and PF-AHP. The first three criteria are the same in all methods: cost, speed, and reliability, though the orders of first and third criteria in AHP (cost, speed and reliability) are different from F-AHP and PF-AHP (reliability, speed and cost).

The sequence of most influential logistic factors to AHP is cost (C1), speed (C2), reliability (C3), customer satisfaction (C4), company image (C6), distribution channel (C5), technological innovations and logistic 4.0 (C8) and environmentally friendliness (C7) in Table 5. The sequence of most influential logistic factors to F-AHP is reliability (C3), speed (C2), cost (C1), customer satisfaction (C4), distribution channel (C5), company

Table 3. Decision Matrix for PF-AHP

| | C1 | C2 | C3 | C4 |
|----|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| C1 | (0.196,0.1965),(0.196,0.196) | (0.45,0.55),(0.45,0.55) | (0.20, 0.35),(0.65,0.80) | (0.65,0.80),(0.20,0.35) |
| C2 | (0.45,0.55),(0.45,0.55) | (0.196,0.196),(0.196,0.196) | (0.45,0.55),(0.45,0.55) | (0.55,0.65),(0.35,0.45) |
| C3 | (0.65,0.80),(0.20,0.35) | (0.45,0.55),(0.45,0.55) | (0.196,0.1965),(0.1965,0.196) | (0.9,1),(0,0) |
| C4 | (0.20,0.35),(0.65,0.80) | (0.45,0.55),(0.45,0.55) | (0,0),(0,9,1) | (0.196,0.196),(0.196,0.196) |
| C5 | (0,0),(0,9,1) | (0,0),(0,9,1) | (0,0),(0,9,1) | (0.45,0.55),(0.45,0.55) |
| C6 | (0.10,0.20),(0.8,0.9) | (0,0),(0,9,1) | (0.35,0.45),(0.55,0.65) | (0.45,0.55),(0.45,0.55) |
| C7 | (0.20,0.35),(0.65,0.80) | (0.20,0.35),(0.65,0.80) | (0,0),(0,9,1) | (0.20,0.35),(0.65,0.80) |
| C8 | (0.20,0.35),(0.65,0.80) | (0.20,0.35),(0.65,0.80) | (0.35,0.45),(0.55,0.65) | (0.20,0.35),(0.65,0.80) |
| | C5 | C6 | C7 | C8 |
| C1 | (0.9,1),(0,0) | (0.8,0.9),(0.10,0.20) | (0.65,0.80),(0.20,0.35) | (0.65,0.80),(0.20,0.35) |
| C2 | (0.9,1),(0,0) | (0.9,1),(0,0) | (0.65,0.80),(0.20,0.35) | (0.65,0.80),(0.20,0.35) |
| C3 | (0.9,1),(0,0) | (0.55,0.65),(0.35,0.45) | (0.9,1),(0,0) | (0.55,0.65),(0.35,0.45) |
| C4 | (0.45,0.55),(0.45,0.55) | (0.45,0.55),(0.45,0.55) | (0.65,0.80),(0.20,0.35) | (0.65,0.80),(0.20,0.35) |
| C5 | (0.196,0.196),(0.196,0.196) | (0.65,0.80),(0.20,0.35) | (0.65,0.80),(0.20,0.35) | (0.20,0.35),(0.65,0.80) |
| C6 | (0.20,0.35),(0.65,0.80) | (0.196,0.196),(0.196,0.196) | (0.45,0.55),(0.45,0.55) | (0.45,0.55),(0.45,0.55) |
| C7 | (0.20,0.35),(0.65,0.80) | (0.45,0.55),(0.45,0.55) | (0.196,0.196),(0.196,0.196) | (0.20,0.35),(0.65,0.80) |
| C8 | (0.65,0.80),(0.20,0.35) | (0.45,0.55),(0.45,0.55) | (0.65,0.80),(0.20,0.35) | (0.196,0.196),(0.196,0.196) |

Results of three applied methods; including AHP, F-AHP and PF-AHP, are investigated. The logistic factors (e.g. C1-C8) are compared with respect to results of AHP, F-

image (C6), technological innovation and logistic 4.0 (C8) and environmentally friendliness (C7) in Table 5.

Table 4. Results of PF-AHP

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | Weights |
|----|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|---------|
| C1 | 1,000 | 0,848 | 0,161 | 3,766 | 19,448 | 9,512 | 3,766 | 3,766 | 0,213 |
| C2 | 0,848 | 1,000 | 0,848 | 1,688 | 19,448 | 19,447 | 3,766 | 3,766 | 0,257 |
| C3 | 3,766 | 0,848 | 1,000 | 19,448 | 19,448 | 1,408 | 19,448 | 1,688 | 0,339 |
| C4 | 0,073 | 0,424 | 0,032 | 1,000 | 0,848 | 0,848 | 3,766 | 3,766 | 0,054 |
| C5 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,848 | 1,000 | 3,766 | 3,766 | 0,161 | 0,049 |
| C6 | 0,068 | 0,032 | 0,424 | 0,848 | 0,161 | 1,000 | 0,848 | 0,848 | 0,021 |
| C7 | 0,161 | 0,161 | 0,308 | 0,161 | 0,161 | 0,848 | 1,000 | 0,161 | 0,015 |
| C8 | 0,161 | 0,161 | 0,424 | 0,161 | 3,766 | 0,848 | 3,766 | 1,000 | 0,052 |

Table 5. Comparative Analysis of different linguistic scales

| Weights | AHP | F-AHP | PF-AHP | Order | AHP | F-AHP | PF-AHP |
|----------------|--------------|--------------|--------------|-------|-----|-------|--------|
| W ₁ | 0,282 | 0,176 | 0,213 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| W ₂ | 0,219 | 0,181 | 0,257 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| W ₃ | 0,183 | 0,192 | 0,339 | 3 | 3 | 1 | 1 |
| W ₄ | 0,090 | 0,109 | 0,054 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| W ₅ | 0,063 | 0,100 | 0,049 | 5 | 6 | 5 | 6 |
| W ₆ | 0,074 | 0,091 | 0,021 | 6 | 5 | 6 | 7 |
| W ₇ | 0,039 | 0,073 | 0,015 | 7 | 8 | 8 | 8 |
| W ₈ | 0,050 | 0,078 | 0,052 | 8 | 7 | 7 | 5 |

The sequence of most influential logistic factors to PF-AHP is reliability (C3), speed (C2), cost (C1), customer satisfaction (C4), technological innovation and logistic 4.0 (C8), distribution channel (C5), company image (C6) and environmentally friendliness (C7) in Table 5..

The top 10 logistic firms (A1-A10) in Turkey are scored, compared and ranked with respect to most influential logistic factors and PF-AHP weights. We employ the PF-AHP weights to rank the logistic firms, because PF-AHP captures the condition for degrees of membership and non-membership greater than 1.

Table 6 illustrates the comparison of logistic firms. We didn't mention the name of logistic firms that are compared due to commercial reasons. Considering most influential logistic factors, rank of logistic firms are (e.g. A6, A7, A9, A4, A10, A2, A1, A8, A5 and A3) different than their economic magnitudes (A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10).

4 CONCLUSION AND FUTURE REMARKS

Logistic activities have focused on improving services and reducing costs. Research results corroborate this since most significant three criteria are revealed as cost; speed and reliability are in line with this objective in all methods, which are AHP, F-AHP, PF-AHP. We think that the differences with in the AHP, F-AHP and PF-AHP results may stem from expressing evaluation in exact values, linguistic terms or in some cases it may be

related to fulfilling the condition for degrees of membership and non-membership.

Our suggestions for future work is evaluating and comparing the same; e.g. top 10 logistic firms in Turkey with respect to each criterion with a F-MCDM approach based on Pythagorean fuzzy sets. After that F-MCDM evaluation results can be compared with the scoring results gathered in this study.

NOMENCLATURE

- AHP:** Analytic Hierarchy Process
- F-AHP:** Fuzzy Analytic Hierarchy Process
- FMEA:** Failure Mode Effect Analysis
- MCDM:** Multi Criteria Decision Making
- MOORA:** Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis
- PF:** Pythagorean Fuzzy
- PFS:** Pythagorean Fuzzy Sets
- PFN:** Pythagorean Fuzzy Numbers
- PF-AHP:** Pythagorean Fuzzy Analytic Hierarchy Process
- PROMETHEE:** The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
- TOPSIS:** Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

Table 6. Comparative Analysis of different logistic firms

| Criteria | Weights | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 |
|--------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| C1 | 0.213 | 80 | 60 | 75 | 85 | 65 | 70 | 85 | 75 | 95 | 90 |
| C2 | 0.257 | 75 | 90 | 85 | 65 | 60 | 75 | 80 | 50 | 60 | 70 |
| C3 | 0.339 | 65 | 65 | 40 | 75 | 70 | 90 | 65 | 75 | 70 | 65 |
| C4 | 0.054 | 50 | 45 | 50 | 85 | 80 | 75 | 70 | 65 | 60 | 50 |
| C5 | 0.049 | 95 | 90 | 70 | 75 | 85 | 85 | 90 | 95 | 95 | 85 |
| C6 | 0.021 | 50 | 55 | 60 | 55 | 45 | 60 | 50 | 70 | 50 | 60 |
| C7 | 0.015 | 20 | 45 | 45 | 60 | 50 | 60 | 85 | 75 | 60 | 55 |
| C8 | 0.052 | 30 | 50 | 40 | 30 | 60 | 50 | 45 | 55 | 65 | 50 |
| Total | 1 | 68.6 | 69.2 | 61.5 | 72.1 | 66.2 | 77.6 | 73.5 | 67.8 | 72.6 | 70.7 |

RBV: Resource-Based View

F-VIKOR: Fuzzy VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje,

REFERENCES

- [1] Hensher, D. and Brewer, A., "Transport: An Economics and Management Perspective", *Oxford University Press*, UK (2000).
- [2] Kumru, M. and Kumru, P.Y., "Analytic hierarchy process application in selecting the mode of transport for a logistics company" *J. Adv. Transp.* 48: 974–999, (2014).
- [3] Du, B., Guo, S., Huang, X., Li, Y. and Guo, J., A "Pareto supplier selection algorithm for minimum life cycle cost of complex product system", *Exp. Sys. with Appl.*, 42: 4253–4264, (2015).
- [4] Lai, K.-H., Ngai, E. W. T. and Cheng, T. C. E., "Measures for evaluating supply chain performance in transport logistics", *Transp. Res. Part E Log. and Transp. Rev.*, 38:439–456, (2002).
- [5] Liu, C.L. and Lyons, A. C., "An analysis of third-party logistics performance and service provision", *Transp. Res. Part E Log. and Transp. Rev.*, 47(4): 547–570, (2011).
- [6] Moghaddam, K. S., "Fuzzy multi-objective model for supplier selection and order allocation in reverse logistics systems under supply and demand uncertainty", *Exp. Sys. with Appl.*, 42:6237–6254, (2015).
- [7] Rezaei, J., Fahim, P. and Tavasszy, L., "Supplier selection in the airline retail industry using a funnel methodology: Conjunctive screening method and fuzzy AHP", *Exp. Sys. with Appl.*, 41: 8165–8179, (2014).
- [8] Straight, R. L., "Measuring contractors' performance", *J. Sup.Chain Manag.*, 35(1):18–28, (1999).
- [9] Wernerfelt, B., "A resource-based view of the firm", *Strat. Manag. J.*, 5: 171–180, (1984).
- [10] Barney, J., "Firm resources and sustained competitive advantage", *J. Manag.*, 17(1): 99–120, (1991)
- [11] Hartmann, E. and Grahl, A. D., "The flexibility of logistics service providers and its impact on customer loyalty: an empirical study", *J. Sup. Chain Manag.*, 47: 63–85, (2011)
- [12] Hunt, S. D., "Commentary – a general theory of competition: Issues, answers and an invitation", *Euro. J. Market.*, 35: 524–548 (2001)
- [13]Lai, F., Li, D., Wang, Q., and Zhao, X., "The information technology capability of third-party logistics providers: A resource-based view and empirical evidence from China", *J. Sup. Chain Manag.*, 44: 22–38, (2008)
- [14] Karia, N. and Wong, C. Y., "The impact of logistics resources on the performance of Malaysian logistics service providers", *Manag. Oper.*, 24(7): 589–606 (2013)
- [15]Churchman C.W., Ackoff R.L. and Arnoff E.L., "Introduction to Operations Research", *John Wiley & Sons*: New York (USA), (1957)
- [16]Yager, R., "Pythagorean membership grades in multi criteria decision making", *IEEE Transactions On Fuzzy Systems*, 22(4): 958-965 (2014).
- [17]Yucesan, M. and Kahraman, G., "Risk evaluation and prevention in hydropower plant operations: A model based on Pythagorean fuzzy AHP", *Energy Policy*, 343-351, (2019)
- [18]Gul, M. and Ak, M.F., "A comparative outline for quantifying risk ratings in occupational health and safety risk assessment", *J. Clean. Prod.*, 196: 653-664, (2018)
- [19] Ilbahar, E., Karaşan, A., Cebi, S. and Kahraman, C., "A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system", *Safety Science*, 103: 124-136, (2018)
- [20]Karasan, A., Ilbahar, E. and Kahraman, C. "A novel pythagorean fuzzy AHP and its application to landfill site selection problem", *Soft Comput.*, article in press, (2018)
- [21]Meteci, S., "Assessing occupational risks in pipeline construction using FMEA-based AHP-MOORA integrated approach under Pythagorean fuzzy environment", *Hum. Ecol. Risk Assess.*, article in press, (2018)
- [22]Gul, M., "Application of Pythagorean fuzzy AHP and VIKOR methods in occupational health and safety risk assessment: the case of a gun and rifle barrel external surface oxidation and coloring unit", *Int. J. Occup. Safety and Ergon.*, 1-15, (2018)
- [23]Wang, L., Wang, H., Xu, Z. and Ren, Z., "The interval-valued hesitant Pythagorean fuzzy set and its applications with extended TOPSIS and Choquet integral-based method" *Int. J. Intel. Sys.*, 34(6): 1063-1085, (2019)
- [24]Liang, D. and Xu, Z. , "The new extension of TOPSIS method for multiple criteria decision making with hesitant Pythagorean fuzzy sets", *Appl. Soft Comp. J.*, 60:167-179, (2017)
- [25] Garg, H., "A new improved score function of an interval-valued pythagorean fuzzy set based topsis method" *Int. J. Uncer. Quant.*,7(5): 463-474, (2017)
- [26]Liang, D., Zhang, Y., Xu, Z. and Jamaldeen, A., "Pythagorean fuzzy VIKOR approaches based on TODIM for evaluating internet banking website quality of Ghanaian banking industry", *Appl. Soft Comp. J.*, 78: 583-594, (2019)
- [27] Cui, F. B., You, X. Y., Shi, H. and Liu, H.C., "Optimal siting of electric vehicle charging stations using pythagorean fuzzy vikor approach", *Math. Prob. in Eng.*, (2018)
- [28] Zhang, Z.X., Hao, W. N., Yu, X. H., Zhang, S. J. and Chen, J.Y., "Pythagorean fuzzy preference ranking organization method of enrichment evaluations", *Int. J. Intel. Sys.*, article in press, (2019)
- [29]Bolturk, E., "Pythagorean fuzzy CODAS and its application to supplier selection in a manufacturing firm", *J. Enterp. Infor. Manag.*, 31(4): 550-564, (2018)
- [30] Saaty, T. L., "How to make a decision: the analytic hierarchy process", *Euro. J. Oper. Res.*, 48: 9-26, (1970)
- [31] Şenol, M.B., Dağdeviren, M., Kurt, M. and Çilingir, C., "Evaluation of cockpit design by using quantitative and qualitative tools", *IEEE Int. Conf. on Ind. Eng. and Eng. Manag.*, 847-851, (2009).
- [32] Şenol, M.B., Dağdeviren, M., Kurt, M. and Çilingir, C., "Display panel design of a general utility helicopter by applying quantitative and qualitative approaches", *Hum. Fact. Ergon. in Manuf.*, 20 (1): 73-86, (2010).
- [33] Şenol, M.B., Dağdeviren, M. and Kurt, M., "A multi criteria approach for aircraft cockpit interface evaluation", *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, 28 (4): 685-693, (2013)

- [34] Dağdeviren, M., "Decision making in equipment selection: an integrated approach with AHP and PROMETHEE", *J. Intel. Manuf.*, 19: 397-406, (2008)
- [35] Dağdeviren, M, Eren, T., "Analytic hierarchy process and use of 0-1 goal programming methods in selecting supplier firm", *J. Fac. Eng. Archit., Gazi Univ. Cilt* 16, 41-52, (2001)
- [36] Bozdağ, C.E., Kahraman, C. and Ruan, D., "Fuzzy group decision making for selection among computer integrated manufacturing systems", *Comp. Ind.*, 5: 13-29, (2003)
- [37] Büyüközkan, G., Ertay, T., Kahraman, C. and Ruan, D., "Determining the importance weights for the design requirements in the house of quality using the fuzzy analytic network approach", *Int. J. Intel. Syst.*, 19: 443-461, (2004)
- [38] Xiaohua, W. and Zhenmin, F., "Sustainable development of rural energy and its appraising system in China", *Renew. Sustain. Energ.*, 6: 395-404, (2002)
- [39] Yedla, S. and Shresta, R.M., "Multi-criteria approach for the selection of alternative options for environmentally sustainable transport system in Delhi", *Transp. Res.*, 37: 717-729, (2003)
- [40] Aras, H., Erdogmus, S. and Koc, E., "Multi-criteria selection for a wind observation station location using analytic hierarchy process", *Renew. Energ.*, 29: 1383-1392, (2004)
- [41] Tolga, E, Demircan, M.L., and Kahraman, C., "Operating system selection using fuzzy replacement analysis and analytic hierarchy process", *Int. J. Prod. Econ.*, 97: 89-117, (2005)
- [42] Kim, P. P., Lee K. J. and Lee B.W., "Selection of an optimal nuclear fuel cycle scenario by goal programming & analytic hierarchy process", *Ann. of Nucl. Energy*, 26: 449-460, (1999)
- [43] Topraklı, A. Y., Kabak, M., Özceylan, E. and Adem, A., "Prioritization of mosque facility site selection criteria under fuzzy environment", *13. Int. Conf. on Theory and Appl. of Fuzzy Sys. Soft Comp.*, (2018)
- [44] Zhang, X. and Xu, Z., "Extension of topsis to multiple criteria decision making with pythagorean fuzzy sets" *Int. J. Intel. Syst.*, 1061-1078, (2014)
- [45] Peng, X. and Yong, Y., "Some results for pythagorean fuzzy sets" *Int. J. Intel. Syst.*, 1133-1160, (2014)

Gerçekme notu / Retraction note



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Retraction: Modification of hardening parameter for computational plasticity

Gerçekme: Hesaplamalı plastizite için sertleştirme parametresinin modifikasyonu

*Yazar (Author): Mehmet Hanifi DOĞRU**

**Gaziantep University, Aeronautics and Aerospace Faculty, Pilotage Department, Gaziantep / TURKEY (Received : 29.07.2016 ; Accepted : 22.12.2016)
mhdogru@gantep.edu.tr*

Doğru M. H., "Modification of hardening parameter for computational plasticity", Politeknik Dergisi, 20(3): 647-650, (2017).

Yukarıda bilgileri verilen dergimiz 2017 yılı 3 sayısında 647-650 sayfa aralığında yayımlanmış olan makalenin yazarı tarafından geri çekildiği bildirilmiştir.

It is declared that the article given the details above and published in 3rd issue of 2017 on pp. 647-650 in our journal has been retracted by it's author.