

Kırıkkale University International Journal of Engineering Research and Development

International Peer Reviewed Journal
e-ISSN: 1308-5514



Volume: 12
Issue: 1

JANUARY 2020

Kırıkkale Üniversitesi
Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
Uluslararası Hakemli Dergi

Cilt: 12 Sayı:1 Ocak 2020



**MÜHENDİSLİK
FAKÜLTESİ**

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ / KIRIKKALE UNIVERSITY

**Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development**

Sahibi / Owner

Ersan ASLAN
Rektör / Rector

Editör/Editor

Ali ERİŞEN

Yardımcı Editörler / Associate Editors

Ertuğrul ÇAM
Murat LÜY

Alan Editörleri / Area Editors

Atila ERGÜZEN - Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering
Murat İNAL - Biyomühendislik / Bioengineering
Burak BİRGÖREN - Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering
Tolga EREN - Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering **Ali**
Payıdar AKGÜNGÖR - İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering
Hakan ARSLAN - Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering
Tuna AYDIN – Metalurji ve Malzeme Mühendisliği / Metallurgical and Materials Engineering

Dergi Sekreteryası / Journal Secretariat

Hüseyin AYDİLEK

Yazışma Adresi /Address

Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi 71450-
Kampüs- Kırıkkale- TÜRKİYE

<http://ijerad.kku.edu.tr>

ijerad@kku.edu.tr

Tel : +90-318-357-42 42 (1001)

Fax: +90-318-357-24 59

ISSN- Online: 1308-5514

Ocak 2020 / January 2020

Kapak Tasarım / Graphics Design: Hüseyin AYDİLEK

Danışma Kurulu / Editorial Board
(*Alfabetik Sıralama / Alphabetical*)

- A. Serdar YILMAZ Sütçü İmam Üniversitesi
Ahmet Kürşat TÜRKER Kırıkkale Üniversitesi
Ali Payıdar AKGÜNGÖR Kırıkkale Üniversitesi
Ayten ÇELEBİ KESKİN Kırıkkale Üniversitesi
Hasan Şakir BİLGE Gazi Üniversitesi
Hüseyin CANBOLAT Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
İbrahim UZUN Kırıkkale Üniversitesi
İlhami DEMİR Kırıkkale Üniversitesi
İlhan KOCAARSLAN İstanbul Üniversitesi
İsa NAVRUZ Ankara Üniversitesi
M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU Gazi Üniversitesi
M. Tunay GENÇOĞLU Fırat Üniversitesi
Mehmet Ali AKÇAYOL Gazi Üniversitesi
Metin DAĞDEVİREN Gazi Üniversitesi
Mustafa YİĞİTOĞLU Kırıkkale Üniversitesi
Mustafa TÜRK Kırıkkale Üniversitesi
Nihat İNANÇ Kırıkkale Üniversitesi
Osman YILDIZ Kırıkkale Üniversitesi
Ömer Muhammet SOYSAL Louisiana State University
Recep ÇALIN Kırıkkale Üniversitesi
Süleyman ERSÖZ Kırıkkale Üniversitesi
Tamer EREN Kırıkkale Üniversitesi



MÜHENDİSLİK
FAKÜLTESİ

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ / KIRIKKALE UNIVERSITY

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development

Amaç

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi mühendisliğin tüm disiplinlerinde çalışılmış olan orijinal ve yüksek kalitedeki araştırma sonuçlarını basan ve teşvik eden bir araştırma dergisidir. Akademisyenler, bilim adamları, üniversitelerdeki araştırmacılar ve ilgi duyan herkesin çalışmaları basım için düşünülebilir.

Aim

International Journal of Engineering Research and Development is a peer-reviewed international research journal aiming at promoting and publishing original high-quality research in all disciplines of engineering sciences and technology. Manuscripts are invited from academicians, scientists, researchers of universities and industry and for all interested people for publication consideration.

Araştırma Alanı

Mühendislik Teorisi ve Uygulamaları

Research Highlights

Engineering Theory and Applications

Kapsam

Derginin ilgi alanlarında, sınırlama olmaksızın, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Makina Mühendisliği, İnşaat Mühendisliği, Bilgisayar Mühendisliği ve Endüstri Mühendisliği bulunmaktadır.

Scope

Areas includes (but not limited to) all issues in Electrical&Electronics Engineering, Mechanical Engineering, Civil Engineering, Computer Engineering and Industrial Engineering.

Yazarlara Bilgi

Ayrıntılı bilgi için lütfen <http://ijerad.kku.edu.tr/> adresini ziyaret ediniz.

Authors Information

For detailed information please visit <http://ijerad.kku.edu.tr>

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye’de Yaygın Kullanımını Engelleyen Faktörlerin Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ve Kalite Evi ile Analiz Edilmesi**
- 1 *Analysis of the Factors Hindering the Widespread Use of Renewable Energy Resources in Turkey Using Multi Criteria Decision Making Techniques and House of Quality* 1-12
Mehmet Ali Ilgın, Elifnur Alkan
DOI: 10.29137/umagd.469519
- Artificial Neural Network Modeling of The Removal of Cr (VI) on by Polymeric Calix[6]arene in Aqueous Solutions** 13-20
Abdullah Erdal Tümer
DOI: 10.29137/umagd.472269
- Assessment of Mechanical and Thermal Properties of Juniperus Drupacea/Epoxy Biocomposite** 21-31
Mustafa Taşyürek, Sait Aras
DOI: 10.29137/umagd.519643
- Asfalt Yolların Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi: İstanbul O3 Otoyolunda Uygulanması**
- 4 *Life Cycle Cost Analysis of Asphalt Roads: Case Study on Istanbul O3 Motorway* 32-39
İbrahim Altan Karahacıoğlu, Adnan Corum
DOI: 10.29137/umagd.541442
- Stronsiyum Hekzaferrit Esaslı Ticari Seramik Mıknatısların Mikroyapısal Ve Manyetik Karakterizasyonu** 40-46
Microstructural and Magnetic Characterization of The Commercial Strontium Hexaferrite Ceramic Magnets
Burcu Ertuğ
DOI: 10.29137/umagd.542032
- Dıştan Dişli Pompalarda Dış Ucundaki Kaçakların Teorik ve Sayısal Karşılaştırılması** 47-60
Comparison of Theoretical and Numerical Tip Leakages in External Gear Pump
Deniz İmamoğlu, Özgür Ertunç
DOI: 10.29137/umagd.567695
- Silindirle Sıkıştırılmış Beton Karışımlarında Kullanılan Malzemelerin Özellikleri** 61-72
Properties of Materials Used in Roller Compacted Concrete Mixtures
Ali Mardani-Aghabaglou, Sultan Husein Bayqra, Süleyman Özen, Zia Ahmad Faqiri, Kambiz Ramyar
DOI: 10.29137/umagd.569501
- Düşey Mantolu Sıcak Su Tanklarının Isıl Performanslarının Enerji Yükleme ve Boşaltma Periyotlarında Deneysel Olarak İncelenmesi** 73-82
Experimental Investigation of Thermal Performance of Vertical Mantled Hot Water Tanks in Energy Charging and Discharging Periods
Doğan Erdemir
DOI: 10.29137/umagd.573683
- Sintering and Characterization of SiC Reinforced Ni Powders in Microwave Furnace** 83-89
Ahmet Yönetken, Ayhan Erol
DOI: 10.29137/umagd.474003

- Opak Çömlek Sırına Bazalt İlavesinin Araştırılması**
10 *Investigation of Basalt Addition to Opaque Pottery Glaze* 90-97
Elif Eren Gültekin
DOI: 10.29137/umagd.481501
- Hafif Silah Mühimmatları Üretiminde Sertifikasyon Özgünlük ve Tasarım Gereksinimleri ile Kompozit Mühimmatlardaki Gelişmeler**
11 *Certification Originality and Design Requirements in Production of Light Weapon Ammunition and Developments in Composite Ammunition* 98-105
Hande Yavuz
DOI: 10.29137/umagd.500569
- Production of Boric Acid from Microwave-Dehydrated Ulexite Waste by Oxalic Acid Solution Leaching**
12 106-112
Feray Koçan, Salih Uğur Bayça
DOI: 10.29137/umagd.550013
- Sodyum Silikoflorürün Mikroyapı ve Isıl Davranışlarının İncelenmesi**
13 *Microstructural Study and Thermal Behavior of Sodium Silicofluoride* 113-117
Aslı Çakır Arianpour, Farzin Arianpour, Behnam Aali
DOI: 10.29137/umagd.572978
- Fosforesans Pigmentli Vitrifiye Sırları ile Enerji Tasarruflu Yüzeyler**
14 *The Energy Saving Surfaces for the Sanitary-ware Glaze by Means of the Phosphorescent Pigment* 118-124
Nazım Kunduracı, Zahide Bayer Öztürk, Gülfem Binal
DOI: 10.29137/umagd.599028
- Dört Silindirli İçten Yanmalı Bir Motorun Düşey Titreşimine Sebep Olan Kuvvetlerin Analizi**
15 *Analysis of the Forces Causing Vertical Vibration of a Four-Cylinder Internal Combustion Engine* 125-133
Fatih Celtek, Hakan Arslan
DOI: 10.29137/umagd.585341
- The Effects of TIG Welding Rod Compositions on Phase Distributions and Corrosion Properties of Dissimilar 304L and 420 Stainless Steel Welds**
16 134-147
Mustafa Gökhan Murat, Aziz Barış Başyığıt
DOI: 10.29137/umagd.616829
- Sabit Cisme Çarpmaya Bağlı Trafik Kazalarında Etkili Parametrelerin Faktöriyel Tasarım Yöntemi ile Belirlenmesi**
17 *Determination of the Parameters Effective in Traffic Accidents with Fixed Objects by Factorial Design Method* 148-157
Merve Burçin Cenikli, Ali Payıdar Akgüngör
DOI: 10.29137/umagd.618653
- Production and Characterization Of Ti-10Cr-3,33Co-3,33Egg Shelter Composite Materials Using By Powder Metallurgy**
18 158-165
Ahmet Yönetken, Günnur Peşmen, Ayhan Erol
DOI: 10.29137/umagd.474031
- Mechanical & Microstructural Analysis of Armor Steel Welded Joints**
19 *Tekin Özdemir* 166-175
DOI: 10.29137/umagd.488104
- Göz Hareketlerine Dayalı Beyin Bilgisayar Arayüzü Tasarımı**
20 *Design of Brain Computer Interface Based on Eye Movements* 176-188
Engin Koç, Oğuz Bayat, Dilek Göksel Duru, Adil Deniz Duru
DOI: 10.29137/umagd.555494

- Anodizasyon ve Elektriksel Boşalma Plazma Oksidasyon Yüzey İşlemlerinin Ti6Al4V Alaşımının Aşınma Direncine Etkisi**
21 *The Effect of Anodization and Glow Discharge Plasma Oxidation Surface Treatments on the Wear Resistance of Ti6Al4V Alloy* 189-201
Özgül Bayrak, Hojjat Ghahramanzadeh Asl
DOI: 10.29137/umagd.557405
- Türkiye’de Otomotiv Yan Sanayinde Çevreci Tesis Yeri Seçimi Problemi**
22 *Green Facility Location Problem in The Automobile Supply Industry in Turkey* 202-209
Mithat Alper Erşen, Çağrı Sel
DOI: 10.29137/umagd.567193
- Nitratlı Bileşikler ile Hazırlanan YBCO Seramik Süperiletken Malzemelerde Li Katkısının Elektriksel ve Yapısal Etkilerinin İncelenmesi**
23 *Investigation of the Electrical and Structural Effects of Li Doping on YBCO Ceramic Superconducting Materials Prepared with Nitrate Compounds* 210-216
Mustafa Burak Türköz, Ümit Erdem
DOI: 10.29137/umagd.569640
- H₂SO₄ İle Aktive Edilen Keşan Yöresi Bentonitinin Di Azo Boyar Madde Bazik Sarı 28 Denge Adsorpsiyonu Karakteristiklerinin İncelenmesi**
24 *Investigation of Equilibrium Adsorption Characteristics of Di Azo Dyes Basic Yellow 28 of H₂SO₄ Activated Kesan Region Bentonite* 217-225
Yasemen Kalpaklı, Şilan Ekinci, Dilan Ertuş
DOI: 10.29137/umagd.591250
- Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Gecikme Duyarlı CSMA Ortam Erişim Tekniğinin Performans Değerlendirmesi**
25 *Performance Evaluation of Delay Sensitive CSMA Medium Access Technique for Wireless Sensor Networks* 227-235
Muhammed Enes Bayrakdar
DOI: 10.29137/umagd.599000
- Endüstri Mühendisliği Eğitimi ve Endüstri 4.0 İlişkisinin ESOGU Endüstri Mühendisliği Öğrencileri Bakışıyla Analizi**
26 *Analysis of Industrial Engineering Education and Industry 4.0 Relationship with ESOGU Industrial Engineering Students' Perspective* 236-250
Esra Sertel, Yeliz Buruk Şahin, A. Atilla İşlier
DOI: 10.29137/umagd.620733
- Darbe Yüklemeli Lamine Cam Levhaların Sonlu Elemanlar Analizi**
27 *Finite Element Analysis of Laminated Glass Plates Subjected to Impact Loading* 251-264
Ebru Dural
DOI: 10.29137/umagd.620761
- 4 Nisan 2019 Elazığ-Sivrice Depreminin Yığma Yapılara Etkisinin Değerlendirilmesi**
28 *Evaluation of The Effect of The Elazığ-Sivrice Earthquake Dated 4 April 2019 On Masonry Structures* 265-277
Melek Akgül, Orhan Doğan
DOI: 10.29137/umagd.621701
- Yarasa Algoritması Kullanılarak Tek Makinalı Sonsuz Baralı Güç Sisteminin, Geleneksel ve PID Güç Sistem Dengeleyicisi (GSD) Parametrelerinin Belirlenmesi**
29 *Determination of Traditional and PID Power System Stabilizer (PSS) Parameters of Single Machine Infinite Bus Power System Using Bat Algorithm* 278-291
Burak Temel, İbrahim Eke
DOI: 10.29137/umagd.619292

- Isıtılan Mekanlarda İç ve Dış Ortam Sıcaklıklarına Bağlı Mevsimsel Yoğuşma Analizi**
- 30** *Seasonal Condensation Analysis in Heated Spaces Based on Indoor and Outdoor Temperatures* **292-299**
İbrahim Uzun
DOI: 10.29137/umagd.642154
- Estimation of Pipeline Embedment in Soft Submarine Soils by Different Methods**
- 31** *Zeynep H. Özkul* **300-306**
DOI: 10.29137/umagd.626609
- Karbon Nanotüp takviyeli ZA-27 Esaslı Kompozitlerde Karbon Nanotüp Takviye Oranının Mikroyapı Ve Bazı Mekanik Özelliklere Etkisi**
- 32** *Effect of Carbon Nanotube Reinforcement Ratio on Microstructure and Some Mechanical Properties in ZA-27 Based Composites Reinforced with Carbon Nanotube* **307-316**
Muharrem Pul
DOI: 10.29137/umagd.642440
- IoT based Smart Home Testbed using MQTT Communication Protocol**
- 33** *Fikret Yalçınkaya, Hüseyin Aydılek, Mustafa Yasin Erten, Nihat İnanç* **317-324**
DOI: 10.29137/umagd.654056



Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye’de Yaygın Kullanımını Engellenen Faktörlerin Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ve Kalite Evi ile Analiz Edilmesi

Analysis of the Factors Hindering the Widespread Use of Renewable Energy Resources in Turkey Using Multi Criteria Decision Making Techniques and House of Quality

Mehmet Ali Ilgın¹ , Elifnur Alkan¹ 

¹Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 45140, Manisa, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 11/10/2018

Kabul / Accepted: 20/08/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 27/09/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Türkiye, yenilenebilir enerji üretimi için yüksek bir potansiyele sahiptir. Buna karşın, Türkiye'nin enerji ihtiyacının önemli bir kısmı yenilenemeyen enerji kaynakları kullanılarak karşılanmaktadır. Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye’de yaygın kullanımını engelleyen faktörler analiz edilmiştir. İlk olarak, literatür taraması ve anket yoluyla faktörler belirlenmiştir. Daha sonra DEMATEL ve analitik ağ süreci çok kriterli karar verme yöntemleri ile faktörlerin önem düzeyleri belirlenmiştir. Son olarak, Kalite Evi kullanılarak faktörlerin etkilerini azaltacak çözüm önerileri sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler

"Yenilenebilir Enerji, Çok Kriterli Karar Verme, Kalite Evi"

Abstract

Turkey has a great potential for the production of renewable energy. However, a substantial portion of Turkey’s energy needs is fulfilled by using non-renewable energy sources. The factors hindering the widespread use of renewable energy sources in Turkey are analyzed in this study. First, the factors are determined through literature review and a survey. Next, the importance levels of the factors are determined using DEMATEL and Analytical Network Process multi criteria decision making methods. Finally, alternative solutions which lessen the impact of the factors are presented using house of quality.

Key Words

"Renewable Energy, Multi Criteria Decision Making, House of Quality"

1. Giriş

Gelişen teknoloji ve artan dünya nüfusu ile birlikte enerji talebi de artış göstermektedir. Günümüzde enerji talebinin büyük bir kısmı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtlar, yüksek oranda karbon içeren kömür, petrol, doğalgaz gibi enerji kaynaklarıdır. Dünya fosil yakıt üretiminin kısa süre içinde en yüksek seviyeye ulaşacağı ancak ilerleyen zamanda azalacağı ve rezervlerin tükeneceği araştırmalar sonucu ortaya konmuştur (Veziroğlu ve Şahin, 2008).

Fosil yakıtlardaki üretim ve ihtiyaç dengesizliği ülkeleri alternatif enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Sanayileşmiş ülkelerde fosil kaynakların yerine yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı etkin bir şekilde hayata geçirilmeye başlanmıştır. Biyokütle, hidrolik, güneş, rüzgar ve jeotermal gibi başlıca yenilenebilir enerji kaynakları için politikalar geliştirilmekte, mevcut kapasitenin artırılmasını sağlamak için devletler tarafından çeşitli teşvikler verilmektedir (Carley, 2009).

Türkiye’de ise, 2014 verilerine göre hidrolik dışındaki yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgar, biyokütle, güneş ve jeotermal) toplam kurulu güç içerisindeki payı %4,33’tür (Onat, 2018). Bu oran 2015 ve 2016 yıllarında düşük miktarlarda artış göstererek 2016 yılında %7,8’e ulaşmıştır (Uğurlu ve Gokcol, 2017). Yüksek yatırım maliyetleri, teknik personel eksikliği ve bürokratik engeller, yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye’de kullanımında yüksek miktarlarda artış görülmesini engelleyen faktörlerden sadece birkaçıdır (Bezir Çiçek vd., 2009; Kaya, 2006).

Araştırmacılar, yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye’de ve Dünya’nın farklı ülkelerinde yaygın kullanımını etkileyen faktörlerin analizi üzerine çeşitli çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Mondal vd. (2010) Bangladeş’te yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut kullanım durumunu incelemiş ve bu kaynakların yaygın kullanımını engelleyen faktörleri analiz etmişlerdir. Liu ve Pistorius (2012), Kazakistan’ın kırsal kesimlerinde yenilenebilir enerji ile ilgili projelerin mevcut durumunu ve bu projelerin önündeki engelleri analiz etmişlerdir. Zhang vd. (2012) Hong Kong’ta güneş enerjisinin yaygın kullanımını olumsuz yönde etkileyen faktörleri bir anket çalışmasından elde ettikleri verileri analiz ederek incelemişlerdir. Eleftheriadis ve Anagnostopoulou (2015) sistem fonksiyon teorisini kullanarak, Yunanistan’da yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın kullanımını olumsuz yönde etkileyen faktörleri analiz etmişlerdir. Luthra vd. (2015) Hindistan’da yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını olumsuz yönde etkileyen faktörleri analitik hiyerarşi süreci yöntemini kullanarak önceliklendirmiştir. Bezir Çiçek vd. (2009) ve Kaya (2006) Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın kullanımını engelleyen faktörler konusunda değerlendirmelerde bulunmuşlardır.

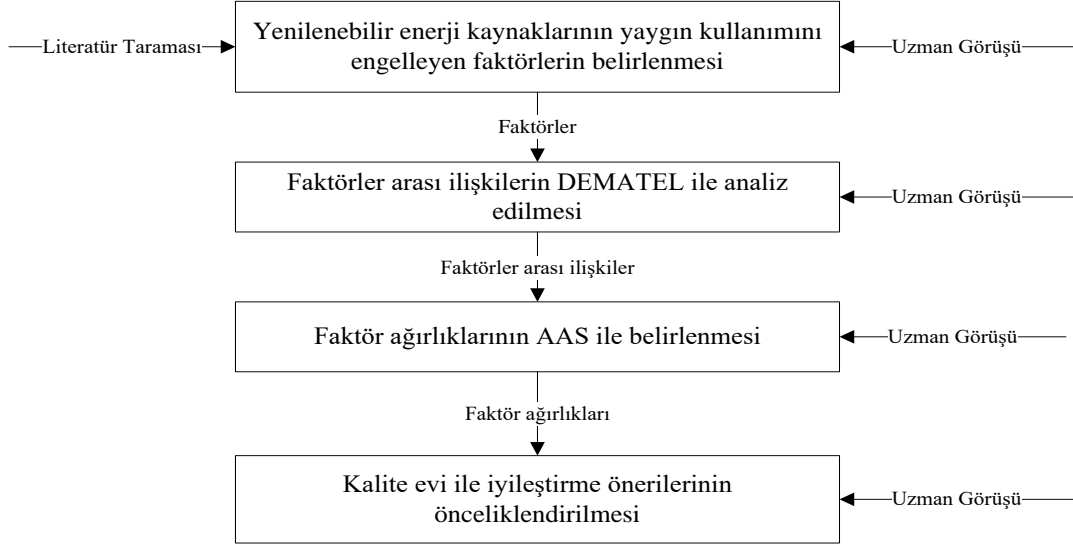
Bu çalışmada Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın kullanımını engelleyen faktörler çok kriterli karar verme teknikleri ve kalite evi kullanılarak incelenmektedir. Çalışmanın ikinci bölümünde faktörler ve bu faktörlerin nasıl belirlendiği açıklanmaktadır. Üçüncü bölümde DEMATEL yöntemi kullanılarak faktörler arası ilişkiler belirlenmektedir. Dördüncü bölüm, Analitik Ağ Süreci yöntemi ile faktörlerin önem düzeylerinin belirlenmesini içermektedir. Beşinci bölümde Kalite Evi kullanılarak iyileştirme önerileri belirlenmekte ve önceliklendirilmektedir. Son bölümde çalışmanın sonuçları hakkında genel bir değerlendirme sunulmaktadır.

2. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yaygın Kullanımını Engelleyen Faktörler

Yenilenebilir enerji konusundaki çalışmalar analiz edilerek, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın kullanımını engelleyen faktörler tespit edilmiştir. Belirlenen faktörler ilgili referanslarla birlikte Tablo 1’de gösterilmiştir. Belirlenen faktörlerin Türkiye enerji piyasası için uygun olup olmadığını belirlemek amacıyla, enerji sektöründe hizmet veren bazı kamu veya özel kurumlarda çalışan 32 kişiye bir anket uygulanmıştır. Her faktör için cevaplanma sayısına bağlı olarak ortalama katılım puanı hesaplanmıştır ve bu puanın yüzdesel karşılığı bulunmuştur.

Katılımcıların %66.45’i geri ödeme süresinin uzun olmasının yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın kullanımını etkilediğini düşünürken katılımcıların sadece %33.79’u yenilenebilir kaynak rezervlerinin kıt olmasının yaygın kullanım üzerinde etkisi olduğunu düşünmektedir. Eşik değer %45 olarak belirlenmiş ve bu değer altında kalan F11, F15, F16 ve F17 faktörleri çalışmanın devamında incelenmemiştir.

Çalışmada izlenen adımlar Şekil 1’de sunulmuştur. Bu şekilde, her bir adımda kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin girdi ve çıktıları belirtilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada izlenen adımlar

Tablo 1. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yaygın Kullanımını Engelleyen Faktörler

Kod	Faktör	Referanslar
F1	Yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımların geri ödeme süresinin uzun olması	Mondal vd. (2010); Zhang vd. (2012); Eleftheriadis ve Anagnostopoulou (2015)
F2	Yüksek ilk yatırım maliyetleri	Mondal vd. (2010); Liu ve Pistorius (2012); Zhang vd. (2012); Eleftheriadis ve Anagnostopoulou (2015); Luthra vd. (2015)
F3	Yenilenebilir enerji üretim tesislerinin bakım maliyetlerinin yüksek olması	Liu ve Pistorius (2012); Zhang vd. (2012); Eleftheriadis ve Anagnostopoulou (2015)
F4	Devletin kişi ya da kurumlara yaptığı mali desteğin eksikliği	Mondal vd. (2010); Liu ve Pistorius (2012); Eleftheriadis ve Anagnostopoulou (2015)
F5	Yenilenebilir enerji kaynakları konusunda yerel halkın eksik bilgilendirilmesi	Beddoe ve Chamberlin (2003); Reiche ve Bechberger (2004); Mondal vd. (2010); Liu ve Pistorius (2012); Eleftheriadis ve Anagnostopoulou (2015)
F6	Yenilenebilir enerji pazar yapısındaki yetersizlikler	Liu ve Pistorius (2012); Eleftheriadis ve Anagnostopoulou (2015)
F7	Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik gücü talebini karşılamak için yeterli olmaması	Armaroli ve Balzani (2007); Luthra vd. (2015)
F8	Özel sektördeki yatırımcıların yenilenebilir enerji konusundaki isteksizliği	Fuchs ve Arentsen (2002); Eleftheriadis ve Anagnostopoulou (2015)
F9	Kamu sektöründeki yatırımcıların yenilenebilir enerji konusundaki isteksizliği	Fuchs ve Arentsen (2002); Eleftheriadis ve Anagnostopoulou (2015)
F10	Yenilenebilir enerji kaynakları konusunda kalifiye teknik personel eksikliği	Liu ve Pistorius (2012); Zhang vd. (2012); Luthra vd. (2015)
F11	Yenilenebilir enerji üretim teknolojilerinin zor ve karışık olması	Kumar vd. (2010); Luthra vd. (2015)
F12	Araştırma & Geliştirme çalışmalarının eksikliği	Liu ve Pistorius (2012); Luthra vd. (2015)
F13	Yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimi için gerekli spesifik teknolojilerin eksikliği	Mondal vd. (2010); Zhang vd. (2012); Luthra vd. (2015)
F14	Teknik eğitim kurumlarının eksikliği	Guerin (2001); Luthra vd. (2015)
F15	Yenilenebilir kaynak rezervlerinin kısıtlılığı	Luthra vd. (2015)
F16	Yenilenebilir kaynakların ekosisteme negatif etki etmesi	Tsoutsos vd. (2005); Luthra vd. (2015)
F17	Coğrafi koşulların yenilenebilir enerji üretiminde yetersiz kalması	Fthenakis vd. (2009); Luthra vd. (2015)
F18	Değişken çevre politikaları	Foxon ve Pearson (2008); Eleftheriadis ve Anagnostopoulou (2015)
F19	Değişken enerji politikaları	Foxon ve Pearson (2008); Eleftheriadis ve Anagnostopoulou (2015)
F20	Yenilenebilir enerji tesislerinin kuruluş izinlerindeki bürokratik engeller	Reiche ve Bechberger (2004); Eleftheriadis ve Anagnostopoulou (2015)
F21	Yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimine ilişkin hedeflerin tutarlı olmaması	White vd. (2013); Luthra vd. (2015)

3. Faktörler Arası İlişkilerin DEMATEL ile Belirlenmesi

Bu bölümde, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın kullanımını engelleyen faktörlerin birbirleri üzerindeki etkileri DEMATEL yöntemi (Gabus ve Fontela, 1972) kullanılarak analiz edilmiştir. DEMATEL, faktörler arasındaki sebep-sonuç ilişkilerini analiz etmek için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ile diğer faktörleri en fazla etkileyen (baskın) faktörler ve diğer faktörler tarafından en fazla etkilenen faktörler belirlenebilmektedir (Paksoy, 2017). Yöntemin adımları çalışmada ele alınan faktörler dikkate alınarak aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır.

3.1. Direkt İlişki Matrisinin Oluşturulması

Faktörlerin ikili karşılaştırmalarını içeren ve Tablo 2’de sunulan direkt ilişki matrisi (A) 0-4 arası değerler içeren DEMATEL karşılaştırma skalasına göre oluşturulmuştur. Bu skalada, 0 rakamı etki olmadığını gösterirken 4 rakamı çok yüksek düzeyde etki olduğunu göstermektedir. Matristeki değerler çalışmanın yazarları ve enerji sektöründen bir profesyonelin sağladığı konsensüsle belirlenmiştir.

Tablo 2. Direkt ilişki matrisi

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F12	F13	F14	F18	F19	F20	F21
F1	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	2	0	0
F2	4	0	0	0	0	0	0	4	4	0	1	3	0	0	0	0	0
F3	3	0	0	0	0	0	0	3	3	0	1	0	0	0	0	0	0
F4	2	3	0	0	0	2	4	4	3	2	2	2	0	0	0	0	2
F5	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	3	1	0	0
F6	2	2	0	0	0	0	2	3	0	0	1	0	0	0	3	0	3
F7	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0	0
F8	0	0	0	4	0	3	4	0	0	2	2	1	1	0	4	0	2
F9	0	0	0	0	0	2	4	3	0	2	3	3	3	0	4	0	2
F10	0	2	2	0	0	0	2	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3
F12	0	0	2	1	0	1	2	1	0	0	0	4	0	2	3	0	0
F13	0	0	0	1	0	0	2	1	0	0	3	0	0	2	3	2	1
F14	0	1	1	0	0	0	1	1	0	4	3	3	0	0	0	0	0
F18	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	1
F19	3	0	0	2	0	3	4	4	0	1	0	0	0	0	0	3	3
F20	1	3	1	1	0	3	2	4	0	0	2	0	0	0	0	0	4
F21	0	0	0	1	0	3	2	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0

3.2. Normalleştirilmiş Direkt İlişki Matrisinin Oluşturulması

Direkt ilişki matrisi, k olarak adlandırılan bir sabit ile çarpılarak normalleştirilmiş direkt ilişki matrisi (M) elde edilir. Bu sabit aşağıda verilen formül yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$k = \text{Min} \left(\frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{1 \leq j \leq n} |a_{ij}|}, \frac{1}{\max_{1 \leq j \leq n} \sum_{1 \leq i \leq n} |a_{ij}|} \right) \quad (1)$$

Formüle göre, direkt ilişki matrisinin satır ve sütun toplamları hesaplanır. En büyük satır ve sütun toplamı değerleri bulunur. Bu değerlerin çarpımına göre tersi alınır ve minimum olan değer k sabiti olarak atanır. Tablo 2’de verilen direkt ilişki matrisinde en büyük satır toplamı değeri 26 ve en büyük sütun toplamı değeri 40’tır. Buna göre k sabitinin değeri 0,025 olarak belirlenir ($k = \text{MIN}(\frac{1}{40}, \frac{1}{26})=0,025$).

3.3. Toplam İlişki Matrisinin Oluşturulması

Toplam ilişki matrisi (T), aşağıdaki formül kullanılarak elde edilir.

$$T = M (I - M)^{-1} \quad (2)$$

Bu formülde M normalleştirilmiş direkt ilişki matrisini ve I birim matrisi simgelemektedir. Elde edilen toplam ilişki matrisi Tablo 3’de sunulmuştur.

Tablo 3. Toplam ilişki matrisi

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F12	F13	F14	F18	F19	F20	F21
F1	0,010	0,005	0,002	0,018	0,000	0,026	0,039	0,126	0,103	0,016	0,019	0,015	0,011	0,004	0,083	0,007	0,023
F2	0,108	0,006	0,004	0,021	0,000	0,027	0,043	0,137	0,113	0,016	0,052	0,094	0,012	0,009	0,049	0,008	0,024
F3	0,080	0,004	0,003	0,013	0,000	0,019	0,028	0,099	0,085	0,012	0,040	0,014	0,009	0,004	0,032	0,003	0,015
F4	0,071	0,089	0,008	0,025	0,000	0,089	0,155	0,154	0,094	0,066	0,083	0,078	0,011	0,016	0,068	0,009	0,084
F5	0,011	0,027	0,001	0,010	0,000	0,013	0,018	0,066	0,030	0,007	0,009	0,008	0,004	0,077	0,044	0,004	0,012
F6	0,067	0,057	0,003	0,021	0,000	0,031	0,086	0,112	0,014	0,011	0,037	0,013	0,004	0,007	0,111	0,009	0,095
F7	0,018	0,030	0,001	0,009	0,000	0,065	0,021	0,026	0,006	0,005	0,006	0,004	0,001	0,052	0,115	0,009	0,018
F8	0,027	0,023	0,008	0,118	0,000	0,114	0,154	0,056	0,014	0,066	0,074	0,045	0,027	0,014	0,146	0,013	0,087
F9	0,022	0,017	0,011	0,028	0,000	0,091	0,157	0,124	0,007	0,070	0,105	0,098	0,079	0,018	0,157	0,017	0,086
F10	0,015	0,055	0,055	0,017	0,000	0,025	0,078	0,102	0,012	0,008	0,088	0,017	0,003	0,009	0,035	0,003	0,088
F12	0,021	0,009	0,052	0,040	0,000	0,047	0,083	0,059	0,010	0,008	0,018	0,107	0,002	0,060	0,108	0,013	0,023
F13	0,018	0,011	0,006	0,041	0,000	0,029	0,084	0,059	0,006	0,008	0,086	0,014	0,002	0,059	0,106	0,059	0,049
F14	0,010	0,034	0,035	0,012	0,000	0,014	0,051	0,052	0,008	0,104	0,096	0,090	0,002	0,012	0,028	0,007	0,018
F18	0,056	0,002	0,001	0,008	0,000	0,012	0,015	0,042	0,007	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001	0,062	0,005	0,034
F19	0,094	0,023	0,005	0,074	0,000	0,118	0,149	0,153	0,018	0,039	0,025	0,013	0,005	0,009	0,054	0,080	0,112
F20	0,048	0,087	0,029	0,048	0,000	0,109	0,093	0,145	0,019	0,012	0,070	0,021	0,005	0,009	0,050	0,005	0,125
F21	0,014	0,010	0,001	0,037	0,000	0,094	0,077	0,074	0,005	0,008	0,010	0,006	0,002	0,005	0,076	0,006	0,020

3.4. Gönderici ve Alıcı Faktörlerin Belirlenmesi

Toplam ilişki matrisi elde edildikten sonra gönderici ve alıcı pozisyonunda bulunan faktörler belirlenir. Matrisin sütunlar toplamı R ve satırlar toplamı D olmak üzere her bir faktör için $D-R$ ve $D+R$ değerleri hesaplanır. Bu değerler aracılığıyla her bir faktörün diğerlerine olan etki seviyesi ile diğerlerinden etkilenme seviyesi belirlenir. D_i değeri i . faktörün diğer faktörler üzerindeki doğrudan veya dolaylı etkisini ve R_i değeri i . faktöre diğer faktörlerden gelen toplam etkiyi gösterir. $D_i + R_i$ değeri i . faktör için gönderilen ve alınan toplam etkiyi gösterir. $D_i - R_i$ değeri ise i . faktörün sisteme yaptığı net etkiyi gösterir.

Gönderici ve alıcı faktörler belirlenirken $D_i - R_i$ değerleri dikkate alınır. Bazı faktörler için $D_i - R_i$ değeri pozitifken bazı faktörler için negatiftir. Pozitif değer, i . faktörün diğerleri üzerinde daha yüksek etkiye sahip olduğunu gösterir. Pozitif değere sahip faktörler net etkileyen, gönderici grubundadır. Negatif değer, i . faktörün diğer faktörlerden daha fazla etkilendiğini gösterir. Negatif değere sahip faktörler net etkilenen, alıcı grubundadır. Her bir faktör için hesaplanan $D_i + R_i$ ve $D_i - R_i$ değerleri Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. $D_i + R_i$ ve $D_i - R_i$ Değerleri

Faktör	$D_i + R_i$	$D_i - R_i$	Faktör	$D_i + R_i$	$D_i - R_i$
F1	1,19	-0,18	F10	1,07	0,15
F2	1,21	0,23	F12	1,48	-0,16
F3	0,69	0,23	F13	1,28	0,00
F4	1,64	0,56	F14	0,75	0,39
F5	0,34	0,34	F18	0,62	-0,11
F6	1,60	-0,25	F19	2,29	-0,35
F7	1,72	-0,94	F20	1,13	0,62
F8	2,58	-0,60	F21	1,36	-0,47
F9	1,64	0,54			

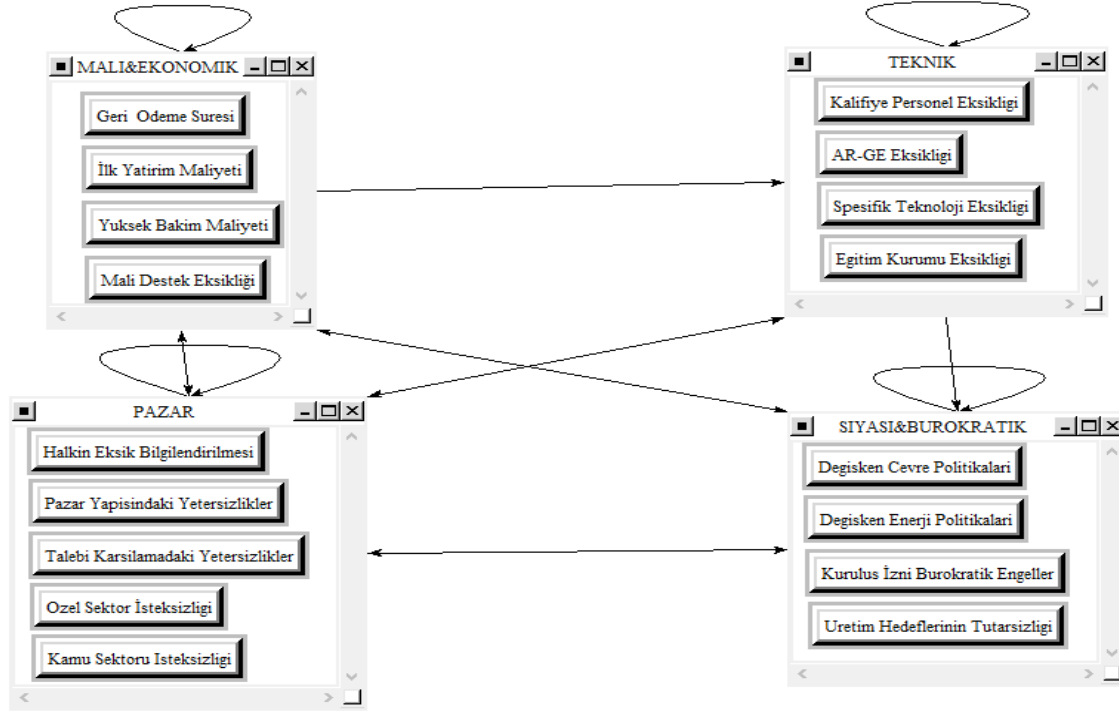
Tablo 4'te yer alan $D_i - R_i$ değerleri dikkate alınarak alıcı ve gönderici gruplarda yer alan faktörler belirlenmiştir. F1, F6, F7, F8, F12, F13, F18, F19 ve F21 faktörleri alıcı grupta yer alır iken F2, F3, F4, F5, F9, F10, F14 ve F20 faktörleri gönderici grupta yer almaktadır.

4. Analitik Ağ Süreci ile Faktör Ağırlıklarının Belirlenmesi

Faktörlerin öncelik değerlerinin belirlenmesinde Analitik Ağ Süreci (AAS) (Saaty, 1996) yöntemi kullanılmıştır. Yöntem, karar verme problemini oluşturan faktörler arasında karşılıklı bağımlılık bulunması durumunda kullanılmaktadır. Yöntemin adımları çalışmada ele alınan faktörler dikkate alınarak aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır.

4.1. Ağ Yapısının Oluşturulması

Faktörlerden 4 farklı küme oluşturulmuştur. Her küme içerisinde benzer özellik gösteren ve aynı amaca hitap eden faktörler bulunmaktadır. DEMATEL sonucunda elde edilen ilişkiler kullanılarak ağ yapısı kurulmuştur. Oluşturulan ağ yapısı Super Decisions programına Şekil 2'de gösterildiği şekilde aktarılmıştır.



Şekil 2. Ağ yapısı

4.2. İkili Karşılaştırmaların Gerçekleştirilmesi

Çalışmanın yazarları ve enerji sektöründen bir profesyonel tarafından faktörlerin ikili karşılaştırmaları yapılmıştır. İkili karşılaştırma matrisleri için yerel öncelik vektörleri Super Decisions programı kullanılarak elde edilmiştir.

4.3. Süper Matrisin Oluşturulması

AAS'de faktörler arasındaki her türlü ilişki süper matris adı verilen parçalı bir matrisle ifade edilir. Bir önceki aşamada elde edilen öncelik vektörleri süper matrisin ilgili sütunlarına girilir. Süper Decisions programında oluşturulan süper matris Şekil 3'te verilmiştir.

4.4. Faktörlerin Önem Düzeylerinin Belirlenmesi

Süper matris önce ağırlıklandırılmış süper matrise ve daha sonra da limit süper matrise dönüştürülür. Limit süper matris, normalize edilmiş ağırlıklı süper matrisin kuvveti alınarak elde edilir. Kuvvet alma işlemi matrisin satırları durağanlaşmaya kadar yapılır. Limit süper matriste elde edilen değerler faktörlerin önem düzeylerini veya ağırlıklarını göstermektedir (Aktaş vd., 2015; Özbek, 2017). Super Decisions programı ile edilen faktör ağırlıkları Şekil 4'te sunulmuştur.

	Geri O ^m	İlk Yat ^m	Mali De ^m	Yüksek ~	Halkın ~	Kamu Se ^m	Özel Se ^m	Pazar Y ^m	Talebi ~	Değişke ^m	Değişke ^m	Kurulus ^m	Üretim ~	AR-GE E ^m	Eğitim ~	Kalifiy ^m	Spesifi ^m
Geri O ^m	0.00000	0.67210	0.00000	0.77092	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.20000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
İlk Yat ^m	0.00000	0.00000	0.49139	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.20000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Mali De ^m	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.31474	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Yüksek ~	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.25239	0.34977	0.00000	0.25239
Halkın ~	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Kamu Se ^m	0.11732	0.06657	0.02694	0.05727	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Özel Se ^m	0.29463	0.13314	0.05448	0.17181	0.00000	0.01821	0.00000	0.10981	0.00000	0.00000	0.06650	0.12740	0.00000	0.00000	0.00000	0.11268	0.00000
Pazar Y ^m	0.00000	0.00000	0.01012	0.00000	0.00000	0.04337	0.09030	0.00000	0.00000	0.00000	0.02793	0.05166	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Talebi ~	0.00000	0.00000	0.05448	0.00000	0.00000	0.06884	0.02258	0.05491	0.00000	0.00000	0.10557	0.02095	0.00000	0.08424	0.00000	0.00000	0.08424
Değişke ^m	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Değişke ^m	0.64805	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.55116	0.47699	0.62646	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.19417	0.00000	0.00000	0.19417
Kurulus ^m	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.30000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Üretim ~	0.00000	0.00000	0.26886	0.00000	0.00000	0.11023	0.09540	0.20882	0.00000	0.00000	0.30000	0.60000	0.00000	0.00000	0.00000	0.25973	0.00000
AR-GE E ^m	0.00000	0.00000	0.09373	0.00000	0.00000	0.06939	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.07057	0.62760	0.46920
Eğitim ~	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.06939	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Kalifiy ^m	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.22403	0.00000	0.00000
Spesifi ^m	0.00000	0.12819	0.00000	0.00000	0.00000	0.06939	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.46920	0.35563	0.00000	0.00000

Şekil 3. Süper Matris

Super Decisions Main Window: Analitik Ağ Süreci... ☰ 🖨 ☰

Here are the priorities.

Icon	Name	Normalized by Cluster	Limiting
No Icon	Geri Odeme Suresi	0.57824	0.073902
No Icon	İlk Yatırım Maliyeti	0.21184	0.027074
No Icon	Mali Destek Eksikliği	0.17937	0.022925
No Icon	Yüksek Bakım Maliyeti	0.03055	0.003905
No Icon	Halkın Eksik Bilgilendirilmesi	0.00000	0.000000
No Icon	Kamu Sektörü İsteksizliği	0.03414	0.011313
No Icon	Ozel Sektör İsteksizliği	0.21983	0.072836
No Icon	Pazar Yapısındaki Yetersizlikler	0.60890	0.201745
No Icon	Talebi Karşılamadaki Yetersizlikler	0.13712	0.045431
No Icon	Değişken Çevre Politikaları	0.00000	0.000000
No Icon	Değişken Enerji Politikaları	0.50136	0.263479
No Icon	Kuruluş İzni Bürokratik Engeller	0.15041	0.079044
No Icon	Üretim Hedeflerinin Tutarsızlığı	0.34823	0.183003
No Icon	AR-GE Eksikliği	0.43685	0.006703
No Icon	Eğitim Kurumu Eksikliği	0.05116	0.000785
No Icon	Kalifiye Personel Eksikliği	0.01147	0.000176
No Icon	Spesifik Teknoloji Eksikliği	0.50052	0.007680

Şekil 4. Faktör ağırlıkları

Şekil 4’te verilen ağırlık değerleri incelendiğinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye’de yaygın kullanımını engelleyen en önemli faktörlerin sırasıyla “değişken enerji politikaları”, “pazar yapısındaki yetersizlikler”, “üretim hedeflerinin tutarsızlığı” ve “kuruluş iznindeki bürokratik engeller” olduğu görülebilir. Bu tabloda bazı faktörlerin ağırlık değerleri sıfırdır. Bu faktörler, sistem içerisinde diğer faktörler üzerinde eşik değeri geçen bir etki yaratmayan faktörlerdir. Analitik ağ yapısında herhangi bir faktörle ilişkilendirilememişlerdir. Bu nedenle ağırlık değerleri sıfır olarak bulunmuştur. Bu faktörler sırasıyla “halkın eksik bilgilendirilmesi” ve “değişken çevre politikaları” olarak sayılabilir.

5. Kalite Evi Kullanılarak İyileştirme Önerilerinin Önceliklendirilmesi

Bu bölümde AAS yönteminde ağırlıkları sıfır olarak bulunan faktörler çalışmadan çıkartılarak kalite evi analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizde AAS ile elde edilen faktör ağırlıkları kullanılmış ve faktörlerin etkisinin azaltılabilmesi ve yenilenebilir enerjinin yaygın kullanımının artırılabilmesi amacıyla düzeltici faaliyetler önerilmiştir. Kalite evi analizinin aşamaları aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır.

5.1. Planlama Matrisinin Oluşturulması

Planlama matrisinin ilk aşamasında, Türkiye’deki yenilenebilir enerji sektörünün faktörler karşısındaki mevcut durumu 1 ile 5 arasında puanlanmıştır. 1 değeri, ilgili faktörün Türkiye pazarını etkilediği anlamına gelmektedir. 5 değeri ise ilgili Faktörün yenilenebilir enerjinin yaygın kullanımını engellemediği, bu faktöre dair çözümün geliştirildiği ve sorunların ortadan kaldırıldığı anlamına gelmektedir. Puanlama aşamasında, anket çalışmasının sonuçlarından yararlanılmıştır. Ancak anket puanlama sistemi, kalite evi planlama matrisinde kullanılan puanlama sisteminin tam tersi olduğu için değerler dönüştürülmüştür. Tablo 5’te her bir faktörün anket değeri ve kalite evinde kullanılan bugünkü değeri sunulmaktadır. Kalite Evi değerleri, anket değerleri 5’ten çıkarılıp 1 eklenerek elde edilmiştir.

Tablo 5. Faktörlerin bugünkü değerleri

Faktör No	Anket Değeri	Kalite Evinde Kullanılan Bugünkü Değer
F1	3,32	2,68
F2	3,61	2,39
F3	2,33	3,67
F4	3,27	2,73
F6	3,47	2,53
F7	3,27	2,73
F8	2,29	3,71
F9	3,33	2,67
F10	3,30	2,70
F12	3,52	2,48
F13	3,10	2,90
F14	3,53	2,47
F19	3,57	2,43
F20	4,10	1,90
F21	3,37	2,63

Planlama matrisinde yer alan sütunlar; faktör ağırlık sütunu, bugünkü değer sütunu, hedef sütunu, ilerleme oranı sütunu, önem puanı sütunu ve yüzde önem sütunudur. Faktör ağırlıkları sütunu analitik ağ sürecinden, bugünkü değer sütunu anket sonuçlarından elde edilmiştir. Hedef değer sütunu, faktörler karşısında ulaşmak istenilen başarıyı temsil etmektedir ve 1-5 arasındadır. 5 değeri, en yüksek değerdir. Bu değerler enerji sektörü konusunda uzman bir çalışan tarafından belirlenmiştir. İlerleme oranı sütunu, faktörler karşısında hedeflenen değerlere ne kadar uzak veya yakın olduğunu göstermektedir. İlerleme oranları, hedef değerler bugünkü değerlere bölünerek elde edilmiştir. Önem puanı sütunu ise daha önce AAS ile elde edilen ağırlıkların ilerleme oranıyla çarpılması sonucu bulunmuştur. Son olarak, her faktörün önem puanı toplam önem puanına bölünerek yüzde önem hesaplanmıştır. Tablo 6’da oluşturulan planlama matrisi yer almaktadır.

Tablo 6. Planlama matrisi

	Faktörler	Ağırlıklar	Güncel Durum	Hedef Değer	İlerleme Oranı	Önem Puanı	%Önem
Mali & Ekonomik Faktörler	Geri Ödeme Süresi	0,073902	2,677	4	1,494	0,110	6,03
	İlk Yatırım Maliyeti	0,027074	2,387	4	1,676	0,045	2,48
	Yüksek Bakım Maliyeti	0,003905	3,667	3	0,819	0,003	0,17
	Mali Destek Eksikliği	0,022925	2,733	5	1,83	0,042	2,29
Pazar Faktörleri	Pazar Yapısındaki Yetersizlikler	0,201745	2,533	5	1,974	0,398	21,74
	Talebi Karşılamadaki Yetersizlikler	0,045431	2,733	5	1,83	0,083	4,54
	Özel Sektör İsteksizliği	0,072836	3,710	4	1,079	0,079	4,29
	Kamu Sektörü İsteksizliği	0,011313	2,667	5	1,875	0,021	1,16
Teknik Faktörler	Kalifiye Personel Eksikliği	0,000176	2,700	3	1,112	0,000	0,01
	AR-GE Eksikliği	0,006703	2,484	4	1,611	0,011	0,59
	Spesifik Teknoloji Eksikliği	0,00768	2,903	4	1,378	0,011	0,58
	Teknik Eğitim Kurumu Eksikliği	0,000785	2,467	3	1,217	0,001	0,05
Siyasi & Bürokratik Faktörler	Değişken Enerji Politikaları	0,263479	2,433	5	2,055	0,541	29,55
	Kuruluş İzni Bürokratik Engeller	0,079044	1,900	5	2,632	0,208	11,36
	Üretim Hedeflerinin Tutarsızlığı	0,183003	2,633	4	1,519	0,278	15,17

Örnek olarak Tablo 6’da yer alan ilk faktörün yüzde öneminin nasıl hesaplandığı şu şekilde açıklanabilir. Geri ödeme süresi için hedef değer olan 4 güncel değer olan 2,677’ye bölünerek ilerleme oranı 1,494 olarak elde edilmiştir. Geri ödeme süresinin ağırlık değeri olan 0,073902 ile ilerleme oranı olan 1,494 çarpılarak 0,110 önem puanı bulunmuştur. Bulunan önem puanı, tüm önem puanlarının toplamı olan 1,832 değerine bölünüp 100 ile çarpılmıştır. Geri ödeme süresi için yüzde önem değeri %6,03 olarak bulunmuştur.

5.2. İlişki Matrisinin Oluşturulması

Faktör etkilerini azaltmak veya ortadan kaldırmak için enerji sektöründe uzman bir çalışan ile görüşülerek tasarlanan düzeltici faaliyetler aşağıda verilmiştir.

- Devlet prosedürlerinin kolaylaştırılması
- Yurtdışından malzeme tedarikine kota konulması
- Devlet teşviğinin artırılması
- Devletin üretilen elektriği alım garantisi vermesi
- Türkiye'nin enerji vizyonunun belirlenmesi
- Yerel bölgelerdeki farklı uygulamaların önüne geçilmesi
- Teknoloji transferlerinin gerçekleştirilmesi
- Yenilenebilir kaynak potansiyelinin doğru analiz edilmesi
- Üniversitelerde ve meslek liselerinde sektör ihtiyaçlarına yönelik bölümler açma

Düzeltilen faaliyetler belirlendikten sonra faktörler ile faaliyetler arasındaki ilişkiler tanımlanmıştır. İlk olarak her faaliyetin her faktör üzerinde herhangi bir etkisinin olup olmadığına karar verilmiştir. Eğer etkiye sahipse de bu etkinin derecesinin ne olduğu değerlendirilmiştir. İlişki düzeyleri sembollerle gösterilmiştir. Kullanılan skala Tablo 7’de sunulmuştur. Oluşturulan ilişki matrisi Tablo 8’de yer almaktadır.

Tablo 7. Semboller ve anlamları

Simge	İlişki	Ağırlık
⊙	Güçlü	9
○	Orta	3
△	Zayıf	1
-	İlişki Yok	0

Tablo 8. İlişki matrisi

Faktörler	Düzeltilici Önemler	Ağırlıklar	Devlet prosedürlerinin kolaylaştırılması	Yurtdışından malzeme tedariğine kota konulması	Devlet teşviğinin artırılması	Devletin üretilen elektriği alım garantisini vermesi	Türkiye'nin enerji vizyonunun belirlenmesi	Yerel bölgelerdeki farkı uygulamaların önüne geçilmesi	Teknoloji transferlerinin gerçekleştirilmesi	Yenilenebilir kaynak potansiyelinin doğru analiz edilmesi	Üniversitelerde ve meslek liselerinde sektör ihtiyaçlarına yönelik bölümler açma
Mali & Ekonomik Faktörler	Geri Ödeme Süresi	0,073902			⊙	⊙				○	
	İlk Yatırım Maliyeti	0,027074	○		⊙		△			○	
	Yüksek Bakım Maliyeti	0,003905							⊙		
Pazar Faktörleri	Mali Destek Eksikliği	0,022925			⊙	⊙	△				
	Pazar Yapısındaki Yetersizlikler	0,201745	△	⊙	○						○
	Talebi Karşılamadaki Yetersizlikler	0,045431								⊙	
	Özel Sektör İsteksizliği	0,072836	○		⊙	⊙	○	○	○		
Teknik Faktörler	Kamu Sektörü İsteksizliği	0,011313					⊙		△	⊙	
	Kalifiye Personel Eksikliği	0,000176					○				⊙
	AR-GE Eksikliği	0,006703			⊙		⊙				⊙
	Spesifik Teknoloji Eksikliği	0,00768							⊙		○
Siyasi & Bürokratik Faktörler	Teknik Eğitim Kurumu Eksikliği	0,000785					⊙				○
	Değişken Enerji Politikaları	0,263479					⊙			⊙	
	Kuruluş İzni Bürokratik Engeller	0,079044	⊙					⊙			
	Üretim Hedeflerinin Tutarsızlığı	0,183003					○			⊙	

5.3. Mutlak ve Görelî Önem Değerlerinin Hesaplanması

Öncelikli faktörlerin ve düzeltici faaliyetlerin belirlenmesi için her bir faaliyetin, faktörlerin etkisini ortadan kaldırmadaki mutlak ve görelî önem dereceleri aşağıda verilen formüllerle hesaplanmıştır.

$$\text{Mutlak Önem} = \sum_{\text{Faktörler}} \text{Faktörün yüzde önemi} * \text{O satıra ilişkin ilişkinin gücü} \quad (3)$$

$$\text{Görelî Önem} = \frac{\text{Mutlak Önem}}{\sum_{\text{Faaliyetler}} \text{Mutlak Önem}} \times 100 \quad (4)$$

Hesaplamanın nasıl yapıldığı şu şekilde açıklanabilir. "Yerel bölgelerdeki farklı uygulamaların önüne geçilmesi" faaliyetinin hangi faktör üzerinde ne düzeyde bir etki derecesine sahip olduğu ilişki matrisinden okunur. Matrise göre, "özel sektör isteksizliği" üzerinde 3 birim, "kuruluş iznindeki bürokratik engeller" üzerinde 9 birim etkilidir. Etki ettiği faktörlerin yüzde önemleri ile etki dereceleri çarpılıp toplanarak bu faaliyetin mutlak önemi bulunur. "Özel sektör isteksizliğinin" yüzde önemi 4,29, kuruluş iznindeki bürokratik engellerin yüzde önemi 11,36 olduğuna göre bu faaliyetin mutlak önemi $(3*4,29)+(9*11,36) = 115,11$ olarak bulunmuştur. Tüm faaliyetlerin mutlak önem derecelerinin toplamı 1692,37 olarak hesaplanmıştır. İki değer birbirine bölünerek $(115,11/1692,37)$ faaliyetin görelî önemi 6,80 olarak bulunmuştur. Mutlak ve bağılı önem dereceleri Tablo 9'da yer almaktadır. En yüksek önem derecesine sahip düzeltici faaliyetin %28 ile "yenilenebilir kaynak potansiyelinin doğru analiz edilmesi" olduğu görülmüştür.

5.4. Kalite Evinin Çatısının Oluşturulması

Kalite evinin çatı kısmında ise düzeltici faaliyetlerin birbirleriyle olan ilişkileri değerlendirilmiştir. Birbirleri ile pozitif ilişkisi olanlar '+1' değeri ile negatif ilişkisi olanlar '-1' değeri ile gösterilmiştir. İlişkisi olmayanlar boş bırakılmıştır. Kalite evi kurulmasının son aşaması olan çatı da oluşturularak ev tamamlanmıştır. Tablo 10'da kalite evinin son hali mevcuttur.

Tablo 9. Mutlak ve görelî önem dereceleri

Faktörler	Düzeltilici Önemler	Ağırlıklar	Devlet prosedürlerinin kolaylaştırılması	Yurtdışından malzeme tedariğine kota konulması	Devlet teşviğinin artırılması	Devletin üretilen elektriği alım garantisini vermesi	Türkiye'nin enerji vizyonunun belirlenmesi	Yerel bölgelerdeki farkı uygulamaların önüne geçilmesi	Teknoloji transferlerinin gerçekleştirilmesi	Yenilenebilir kaynak potansiyelinin doğru analiz edilmesi	Üniversitelerde ve meslek liselerinde sektör ihtiyaçlarına yönelik bölümler açma	Güncel Durum	Hedef Değer	İlerleme Oranı	Önem Puanı	%Önem
Mali & Ekonomik Faktörler	Geri Ödeme Süresi	0,073902			⊙	⊙				○		2,677	4	1,494	0,110	6,03
	İlk Yatırım Maliyeti	0,027074	○		⊙		△			○		2,387	4	1,676	0,045	2,48
	Yüksek Bakım Maliyeti	0,003905							⊙			3,667	3	0,819	0,003	0,17
Pazar Faktörleri	Mali Destek Eksikliği	0,022925			⊙	⊙	△					2,733	5	1,83	0,042	2,29
	Pazar Yapısındaki Yetersizlikler	0,201745	△	⊙	○					○		2,533	5	1,974	0,398	21,74
	Talebi Karşılamadaki Yetersizlikler	0,045431								⊙		2,733	5	1,83	0,083	4,54
	Özel Sektör İsteksizliği	0,072836	○		⊙	⊙	○	○	○			3,710	4	1,079	0,079	4,29
Teknik Faktörler	Kamu Sektörü İsteksizliği	0,011313					⊙		△	⊙		2,667	5	1,875	0,021	1,16
	Kalifiye Personel Eksikliği	0,000176					○				⊙	2,700	3	1,112	0,000	0,01
	AR-GE Eksikliği	0,006703			⊙		⊙			⊙		2,484	4	1,611	0,011	0,59
	Spesifik Teknoloji Eksikliği	0,00768							⊙		⊙	2,903	4	1,378	0,011	0,58
Siyasi & Bürokratik Faktörler	Teknik Eğitim Kurumu Eksikliği	0,000785								○		2,467	3	1,217	0,001	0,05
	Değişken Enerji Politikaları	0,263479					⊙			⊙		2,433	5	2,055	0,541	29,55
	Kuruluş İzni Bürokratik Engeller	0,079044	⊙					⊙				1,900	5	2,632	0,208	11,36
	Üretim Hedeflerinin Tutarsızlığı	0,183003					○			⊙		2,633	4	1,519	0,278	15,17
	Mutlak Önem		144,29	195,66	206,34	113,49	344,88	115,11	20,78	479,31	72,51					
	Görelî Önem		8,53	11,56	12,19	6,71	20,38	6,80	1,23	28,32	4,28					

Tablo 10. Kalite evi

Faktörler	Dinamik Önemi	Ağırlıklar	Kalite Evi										Güncel Durum	Hedef Değer	İlerleme Oranı	Önem Puanı	%Önem	
			Devlet prosedürlerinin kolaylaştırılması	Yurtdışından malzeme tedariğine kota konulması	Devlet teşviğinin artırılması	Devletin üretim elektriği alım garantisini vermesi	Türkiye'nin enerji vizyonunun belirlenmesi	Yerel bölgelerdeki farklı uygulamaların önüne geçilmesi	Teknoloji transferlerinin gerçekleştirilmesi	Yenilenebilir kaynak potansiyelinin doğru analiz edilmesi	Üniversitelerde ve meslek liselerinde sektör ihtiyaçlarına yönelik bölümler açma							
Malî & Ekonomik Faktörler	Gerî Ödeme Süresi	0,073902			⊙	⊙						⊙		2,677	4	1,494	0,110	6,03
	İlk Yatırım Maliyeti	0,027074	⊙		⊙			Δ				⊙		2,387	4	1,676	0,045	2,48
	Yüksek Bakım Maliyeti	0,003905									⊙			3,667	3	0,819	0,003	0,17
	Malî Destek Eksikliği	0,022925			⊙	⊙	Δ							2,733	5	1,83	0,042	2,29
Pazar Faktörleri	Pazar Yapısındaki Yetersizlikler	0,201745	Δ	⊙	⊙							⊙		2,533	5	1,974	0,398	21,74
	Talebi Karşılama Yetersizlikleri	0,045431										⊙		2,733	5	1,83	0,083	4,54
	Özel Sektör İsteksizliği	0,072836	⊙		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙			3,710	4	1,079	0,079	4,29
	Kamu Sektörü İsteksizliği	0,011313									Δ	⊙		2,667	5	1,875	0,021	1,16
Teknik Faktörler	Kalifiye Personel Eksikliği	0,000176										⊙		2,700	3	1,112	0,000	0,01
	AR-GE Eksikliği	0,006703			⊙							⊙		2,484	4	1,611	0,011	0,59
	Spesifik Teknoloji Eksikliği	0,00768									⊙			2,903	4	1,378	0,011	0,58
	Teknik Eğitim Kurumları Eksikliği	0,000785										⊙		2,467	3	1,217	0,001	0,05
Siyasi & Bürokratik Faktörler	Değişken Enerji Politikaları	0,263479										⊙		2,433	5	2,055	0,541	29,55
	Kuruluş İleri Bürokratik Engeller	0,079044	⊙											1,900	5	2,632	0,208	11,36
	Üretim Hedeflerinin Tutarsızlığı	0,183003						⊙				⊙		2,633	4	1,519	0,278	15,17
	Mutlak Önem		144,29	195,66	206,34	113,49	344,88	115,11	20,78	479,31	72,51							
Göreceli Önem		8,53	11,56	12,19	6,71	20,38	6,80	1,23	28,32	4,38								

5.5. Kalite Evinin Analiz Edilmesi

Elde edilen Kalite Evi'ne göre, göreceli önemi en yüksek olan iyileştirme önerisi, “yenilenebilir kaynak potansiyelinin doğru analiz edilmesi” olarak belirlenmiştir. Bu öneriyi, “Türkiye'nin enerji vizyonunun belirlenmesi”, “Devlet teşviğinin artırılması” ve “Yurt dışından malzeme tedariğine kota konulması” önerileri izlemektedir. Bu konularda yapılacak iyileştirmeler, yenilenebilir enerjinin yaygın kullanımını engelleyen birden fazla faktörün etkisinin azalmasını sağlayacaktır.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada yenilenebilir enerji sektörünün Türkiye pazarındaki büyüme ivmesini azaltan faktörler incelenmiştir. İlk olarak, faktörler literatür taraması ve anket yoluyla belirlenmiştir. Daha sonra, faktörler arasındaki ilişkiler DEMATEL yöntemi ile belirlenmiş ve bu ilişkiler esas alınarak Analitik Ağ Süreci yöntemi ile faktörlerin öncelik değerleri tespit edilmiştir. Son olarak Kalite Evi analizi ile faktörlerin etkisini azaltacak iyileştirme önerileri belirlenmiş ve önceliklendirilmiştir. Literatürde Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın kullanımını engelleyen faktörleri analiz eden çalışmalar olmakla birlikte, bu çalışma çok kriterli karar verme teknikleri ile kalite evini bu alanda kullanan ilk çalışmadır. Çalışmanın sonucunda aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın kullanımını sağlayabilmek için analiz edilmesi gereken 4 kök neden mevcuttur. Bunlardan ilkinin “yenilenebilir kaynak potansiyelinin yanlış analiz edilmesi” olduğu söylenebilir. Bu kök nedene bağlı olarak kurulacak tesislerin kapasiteleri doğru belirlenemeyebilir, yenilenebilir kaynaklardan ihtiyacı karşılayacak kadar elektrik enerjisi elde edilemeyeceği düşünülerek yatırım kararlarından vazgeçilip birincil enerji kaynakları tercih edilebilir. Bu nedenle doğru kaynak analizi yapılmalıdır.
- İkinci neden “Türkiye'de gerçekçi bir vizyon belirlenememesi” olarak ortaya çıkmaktadır. Vizyonun yanlış strateji ve öngörüler üzerinden belirlenmesi, doğrudan iç pazarın dengesini değiştirmektedir. Yenilenebilir enerji sektörüne verilen teşvikleri, ayrılacak bütçeyi, kabul edilecek yatırım planı sayısını vb. etkilemektedir. Bu nedenle doğru bir vizyon belirlenmelidir.
- “Devlet teşviğinin yetersizliği” üçüncü nedendir. Özel sektör, öz sermayesinden harcama yapmayı birincil olarak tercih etmediği için, herhangi bir alanda yatırım yapma kararı almasını sağlayacak en önemli unsur teşviklerdir. Sadece teşviklerin artırılması değil, bunun yanında prosedürlerin daha kısa vadede tamamlanabilir olması gerekir. Uzun süreler, yatırımcının kar etme zamanını geciktirmektedir. Bu nedenle devlet teşviği artırılmalıdır.
- “Yerli üreticiye verilen yetersiz teşvikler nedeniyle kişilerin üretim yöntemi geliştirmek yerine dışarıdan almayı tercih etmesi” dördüncü nedendir. Bu durum, Türkiye'yi enerji sektöründe dışa bağımlı hale getirmektedir. Türkiye, üretileni kullanan bir ülke olmaktan çıkıp üretileni inceleyip geliştirebilen bir ülke olursa, hem iç pazardaki enerji sektörü dış faktörlere karşı korunmuş olacak ve hem de mal tedarik edilen ülkelerde olabilecek bir siyasi veya ekonomik krizden etkilenmeyecektir. Ayrıca, yerel üretici sayısı artacak ve diğer ülkelerin tedarikçisi konumuna gelinebilecektir. Bu faktörün olumsuz etkilerinin önüne geçebilmek için yurtdışından malzeme tedarikine kota konulmalıdır.
- Diğer bir yandan faktörlerin yüzde önem değerlerine bakıldığında, Türkiye'nin stratejik plan kapsamında faktörler için ortaya koyduğu hedef değerlere hangi ölçüde ulaştığı görülebilir. Sonuçlara bakıldığında, hedeflenen değerden en uzak olan noktalar “enerji politikaları” ve “pazar alt yapısı” konularıdır. Bu iki konunun önceliği yüksektir ve iyileştirme çalışmalarında bu konulara yoğunlaşılmalıdır.

Bu çalışmada, faktörler, tüm yenilenebilir enerji kaynakları dikkate alınarak belirlenmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda belirli bir yenilenebilir enerji kaynağı dikkate alınıp bu enerji kaynağının yaygın kullanımını olumsuz yönde etkileyen faktörler analiz edilebilir. Bu tür bir analiz, her bir yenilenebilir enerji kaynağına özgü faktörlerin dikkate alınmasını sağlayacaktır.

Referanslar

Aktaş, R., Doğanay, M.M., Gökmen, Y., Gazibey, Y.,Türen, U. (2015). Sayısal Karar Verme Yöntemleri. İstanbul: Beta Yayıncılık.

Armaroli, N.,Balzani, V. (2007). The Future of Energy Supply: Challenges and Opportunities. *Angewandte Chemie International Edition*, 46, 52-66.

Beddoe, M.,Chamberlin, A. (2003). Avoiding confrontation: securing planning permission for on-shore wind energy developments in England: comments from a wind energy developer. *Planning Practice & Research*, 18 (1), 3-17.

Bezir Çiçek, N., Öztürk, M.,Özek, N. (2009). Renewable energy market conditions and barriers in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (6), 1428-36.

Carley, S. (2009). State renewable energy electricity policies: An empirical evaluation of effectiveness. *Energy Policy*, 37 (8), 3071-81.

Eleftheriadis, I.M.,Anagnostopoulou, E.G. (2015). Identifying barriers in the diffusion of renewable energy sources. *Energy Policy*, 80, 153-64.

Foxon, T.,Pearson, P. (2008). Overcoming barriers to innovation and diffusion of cleaner technologies: some features of a sustainable innovation policy regime. *Journal of Cleaner Production*, 16 (1, Supplement 1), S148-S61.

Fthenakis, V., Mason, J.E.,Zweibel, K. (2009). The technical, geographical, and economic feasibility for solar energy to supply the energy needs of the US. *Energy Policy*, 37 (2), 387-99.

Fuchs, D.A.,Arentsen, M.J. (2002). Green electricity in the market place: the policy challenge. *Energy Policy*, 30 (6), 525-38.

Gabus, A.,Fontela, E. 1972. "World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL." In. Geneva, Switzerland: Battelle Geneva Research Center.

Guerin, T.F. (2001). Transferring Environmental Technologies to China: Recent Developments and Constraints. *Technological Forecasting and Social Change*, 67 (1), 55-75.

Kaya, D. (2006). Renewable energy policies in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10 (2), 152-63.

Kumar, A., Kumar, K., Kaushik, N., Sharma, S.,Mishra, S. (2010). Renewable energy in India: Current status and future potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (8), 2434-42.

Liu, M.F.M.,Pistorius, T. (2012). Coping with the energy crisis: Impact assessment and potentials of non-traditional renewable energy in rural Kyrgyzstan. *Energy Policy*, 44, 130-9.

Luthra, S., Kumar, S., Garg, D.,Haleem, A. (2015). Barriers to renewable/sustainable energy technologies adoption: Indian perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 762-76.

Mondal, M.A.H., Kamp, L.M.,Pachova, N.I. (2010). Drivers, barriers, and strategies for implementation of renewable energy technologies in rural areas in Bangladesh - An innovation system analysis. *Energy Policy*, 38 (8), 4626-34.

Onat, N. (2018). Türkiye’de yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretimi: Mevcut durum ve gelecek beklentileri Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 1 (1), 8-15.

Özbek, A. (2017). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ve Excel ile Problem Çözümü. Ankara: Seçkin Yayıncılık.

Paksoy, S. (2017). Çok Kriterli Karar Vermede Güncel Yaklaşımlar. Adana: Karahan Kitabevi.

Reiche, D.,Bechberger, M. (2004). Policy differences in the promotion of renewable energies in the EU member states. *Energy Policy*, 32 (7), 843-9.

Saaty, T.L. (1996). Decision Making with Dependence and Feedback:The Analytic Network Process. Pittsburgh, PA: RWS Publications

Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, 33 (3), 289-96.

Uğurlu, A., Gokcol, C. (2017). An overview of Turkey's renewable energy trend. *Journal of Energy Systems*, 1 (4), 148-58.

Veziroğlu, T.N., Şahin, S. (2008). 21st Century's energy: Hydrogen energy system. *Energy Conversion and Management*, 49 (7), 1820-31.

White, W., Lunnan, A., Nybakk, E., Kulisic, B. (2013). The role of governments in renewable energy: The importance of policy consistency. *Biomass and Bioenergy*, 57, 97-105.

Zhang, X., Shen, L., Chan, S.Y. (2012). The diffusion of solar energy use in HK: What are the barriers? *Energy Policy*, 41, 241-9.



Artificial Neural Network Modeling of The Removal of Cr (VI) on by Polymeric Calix[6]arene in Aqueous Solutions

Abdullah Erdal Tümer^{1,2}

¹Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, 42195, Konya, TÜRKİYE

²Kyrgyz – Turkish Manas University, KYRGYZSTAN

Başvuru/Received: 19/10/2018

Kabul / Accepted: 06/08/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 27/09/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Abstract

The artificial neural network-based model was developed to predict the sorption capacity and removal efficiency of calixarene for Cr(VI) in aqueous solutions. The input variables were initial concentration of Cr(VI), adsorbent dosage, contact time, and pH, while the sorption capacity and the removal efficiency were considered as output. They have been used for the training and simulation of the network in the current work. The training results were tested using the input data (simulated data) that were not shown to the network. According to the indicator, the optimum and most reliable model was found based on the test results

Key Words

“Artificial Neural Network; Modeling; Sorption; Removal Efficiency; Sorption Capacity”

1. Introduction

Artificial neural network is an algorithm that uses computing technique inspired by human brain that has its origin in (McCulloch & Pitts, 1943). ANNs have been applied successfully to broad spectrum of application field on several sciences, in complex systems such as pattern recognition (Gao, Liang, Chen, & Xu, 2015; Köhler, Bock, Hornegger, & Michelson, 2015), dynamic modeling of process operation (Azarpour, Alwi, Zahedi, Madooli, & Millar, 2015), process control and prediction (Chairez, García-Peña, & Cabrera, 2009; Lertworasirikul & Tipsuwan, 2008), parameter estimation for the design of controllers (Boumar, Boulkroune, Boudjema, & Farza, 2015), fault diagnosis of processes (Li, Zhu, Jiang, Zhou, & Chen, 2015), and time series forecasting (Voyant, Nivet, Paoli, Muselli, & Notton, 2015). ANNs have recently been used to model the results obtained in experiments for environmental research studies in particular, such as wastewater treatment processes (Aber, Amani-Ghadim, & Mirzajani, 2009; Amani-Ghadim & Dorraji, 2015; Dutta, Parsons, Bhattacharjee, Bandhyopadhyay, & Datta, 2010; Ghaedi, Ghaedi, & Karami, 2015; Halder, Dhawane, Barai, & Das, 2015; Todoran, Todoran, & Szakacs, 2016; Tomczak, 2011). ANNs can represent the input and output data of various experimental studies as an approximate mathematical function. Artificial neural network architecture has three layers called input layer, hidden layer and output layer.

Method of training the ANN explains the input–output relation for the modeled system using datasets (Sato, Sha, & Palosaari, 1999). The main advantage provided by an ANN model over traditional methods (such as multi linear regression) is that they do not need the complex underlying characteristics of any physical process (Nayak, Rao, & Sudheer, 2006).

In this study, feedforward backpropagation type of artificial neural network model was developed to predict the sorption capacity and removal efficiency of polymer supported calixarenes for Cr (VI) in aqueous solutions. A sorption process requires costly equipment, expertise and time. The most important jobs in the sorption process are modeling and optimization to the process performance at the lowest cost (Khandanlou et al., 2016). One way of low cost modeling is the use of artificial neural networks. In addition, both ANNs have been used for modeling of sorption process in many studies (Babaei et al., 2016; Heibati et al., 2016; Kooh, Dahri, Lim, Lim, & Malik, 2016; Mahmoodi et al., 2016; Mahmoodi, Hosseinabadi - Farahani, & Chamani, 2017; Yurtsever, Yurtsever, Şengil, & Kıratlı Yılmazoğan, 2015) and ANN models have provided reliable and powerful results.

On the other hand, the used polymer supported calixarenes in this study is limited in adsorption process. However, when the related literature is taken into consideration, it can be observed that there have been no reports of ANN modeling of adsorption process carried out with polymeric calixarenes. For the first time in this study, modeling of polymer supported calixarene in sorption process was carried out through ANN method. The ANN model was created by considering 19 different sorption experiment parameters, and the percentages of removal efficiency and sorption capacity dependent on these parameters. The model was the initial time trained using 15 experimental datasets, which were then compared with other 4 experimental data (the used simulated data) to test the model.

Nowadays, the water pollution is an important issue because of the existence of toxic heavy metals in wastewaters produced by industrial resources (F. Fu & Wang, 2011). Chromium (Cr) has a remarkably lot among these toxic heavy metals in wastewater releasing from industry. Cr (VI) is a toxic cation because it passes as HCr_2O_7^- or $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ to cell membranes and damages biological molecules via oxidation. Therefore, interaction with Cr (VI) species can cause various health troubles, such as ulcer disease, skin irritation, pulmonary congestion and liver damage (Sengupta & Clifford, 1986; Zhao, SenGupta, & Stewart, 1998). Thus, the purification of wastewaters with Cr (VI) prior to release is a necessary operation. Various techniques, such as precipitation, solvent extraction, electrochemical purification, evaporation and membrane filtration have been used to purify Cr (VI) pollutants from aqueous media. However, these methods fail to remove them in small concentrations. Thus, among them adsorption is one of the important methods to solve this problem. In the literature, different adsorbents have been used for the removal of Cr (VI) (Sengupta & Clifford, 1986; Zhao et al., 1998). Supramolecular compounds are versatile tools in host-guest chemistry for the production of many host molecules recognizing the neutral or charged guests. Calix[n]arenes composed of phenolic units with linked methylene bridges are such supramolecular compounds and are very well-known as effective and attractive host molecules (Asfari, Böhmer, Harrowfield, & Vicens, 2007; Gutsche, 2008). In a previous work, the preparation and Cr (VI) sorption properties of aminopropyl silica gel-immobilized calix[6]arene polymer (C[6]APS) were studied and the optimum parameters (initial concentration, adsorbent dosage, contact time and pH) belong to Cr(VI) were determined at 25 °C. Although the sorption efficiency and removal capacity of C[6]APS for Cr(VI) has been determined with experimental studies, developing an ANN model for prior estimation of them is important. Thus, based on this experimental dataset, an ANN model was developed in the current study. Furthermore, another innovation in this study is the use of polymeric calixarenes has been modeled through ANN for the first time in the process of adsorption. The results showed that this ANN model could be used to as a considerable performance evaluation tool for the removal efficiency and sorption capacity of C[6]APS for Cr(VI).

2. Definition of ANN

The simplest definition of ANN is a computer simulation originated from biological nervous system (Kang & Yoon, 1994). ANNs learn from example, whereby that existing dataset of input patterns and corresponding output patterns is presented to find out the norms that determine the relationship between the patterns (Heaton, 2008).

This structure consists of three components: nodes (neurons); connections (weights); and training algorithms. Neurons are also called processing elements which communicate by sending signals to many other neurons in the following layer working in parallel to solve a specific problem, thus resulting in various types of ANNs (R.-Q. Fu, Xu, & Pan, 2005). One of the most popular ANNs is the feedforward backpropagation algorithm developed by (Rumelhart, Hinton, & Williams, 1985). The term “feedforward”, describes how this neural network processes and recalls patterns. The term “backpropagation” is described due to the error back propagation modify the network. Backpropagation is a method of training a network. When using the approach, both sample inputs and predicted outputs must be provided to the network (Self, 1988).

A three-layer network model, consisting of 4 neurons in the input layer (contact time, adsorbent dosage, pH, and initial concentration), two hidden layers with 4,5,6,7 neurons respectively, and an output layer with 1 neurons (removal efficiency or sorption capacity) is developed in this study, as shown in Fig. 1.

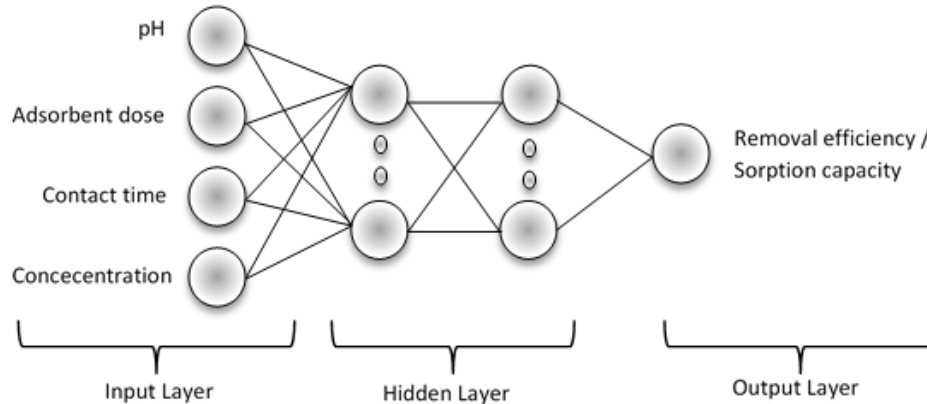


Figure 1. Configuration of ANN

Selecting the appropriate network type and transfer function are crucial tasks for designing a neural network model. In contrast, the qualities of output performance result will unreliable (Dutta et al., 2010). The present work a feedforward backpropagation algorithm was developed. Traincgp was used as a training function. Three transfer functions (tansig, purelin and logsig) were applied for the hidden layer. Table 1 shows the algorithms of altered transfer functions. To construct the ANN model, MATLAB software was used. Adaptability is specified by the number of hidden neurons so the hidden of number neurons are very important in the training process of the ANNs. On the other hand, excessive neurons may result in overfitting in the hidden layer (Self, 1988). So altered numbers of neurons (4,5,6,7) were performed to select the best training algorithm.

Table 1. Transfer functions used in algorithms

Transfer function	Algorithm
Tansig	$\text{tansig}(n) = 2/(1 + \exp(-2n)) - 1$
Purelin	$\text{purelin}(n) = n$, for all n
Logsig	$\text{logsig}(n) = 1/(1 + \exp(-n))$

Mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2) were used in ANN model to assess the best feedforward backpropagation algorithm. The formulas for calculation of, MAE, RMSE and R^2 are:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_{a,i} - Y_{p,i}| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{a,i} - Y_{p,i})^2} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{p,i} - Y_{a,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{a,i} - Y_m)^2} \quad (3)$$

Where n is the number of points, $Y_{a,i}$ is the actual value, Y_m is the mean of actual value and $Y_{p,i}$ is the predicted value.

3. Experimental Description

Preparation of C[6]APS as an adsorbent material and its sorption studies for Cr(VI) are described in a previous study (Tabakci, 2008). The synthetic route for C[6]APS is illustrated in Fig. 2.

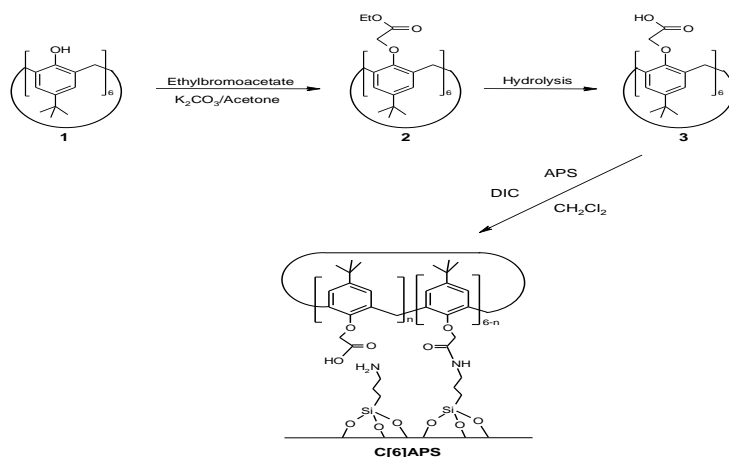


Figure 2. Synthetic route of preparation of C[6]APS

4. Result and Discussion

Two methods are used to determine the number of sorption experiments. The first one is the total number of experiments determined by the expert. The second is the continuation of the experiment until achieving the optimum parameters of the sorption parameters, which provide maximum removal. In this study, experiments were not continued, since optimum results were reached in 19 experiments. Nineteen experimental datasets were used to develop the ANN model, with feedforward backpropagation algorithm, to predict the sorption capacity and removal efficiency of C[6]APS for Cr(VI). The data-set was divided into two subsets training and simulating that contained 15 and 4 samples. The training and simulating subsets of the proportion were 73–27%, respectively. The training data-set was divided into three subsets (training 70%, testing 15% and validation 15%). The ranges of dataset parameters and their related statistic are presented in Table 2.

Table 2. Ranges of data set and their statistic

Parameters	Data Statistic		
	Ranges	Mean \pm S.D.	Unit
Input Layer			
Adsorbent Dosage	25,00 - 100,0	32,89 \pm 20,50	Mg
Concentration	10,40 - 41,6	13,68 \pm 8,52	Ppm
pH	1,50 - 7,5	2,29 \pm 1,75	
Contact Time	30,00 - 180,0	74,21 \pm 36,56	Min
Output Layer			
Removal Efficiency	13,60 - 83,80	63,54 \pm 25,29	%
Sorption Capacity	0,08 - 11,49	3,23 \pm 2,89	mg/g

4.1. Optimization of Network

One of the most important points in designing an ANN model is the choice of suitable and fitting parameters. The chosen training, and transfer functions, and network type may not be suitable for an optimized model. The suitable training algorithm in different layers, the number of hidden layers, the number of neurons, the determination of the transfer and training functions are highly responsive parameters in the design of ANNs. The training results of the ANN model should be compared with the simulated data that were not shown to the network for testing purposes. If the training results do not agree with the simulated results, it will not be possible to develop a suitable model for removal efficiency and sorption capacity. Several parameters were used with different correlations through trial and error, in order to find the best ANN model. Models were designed to generate the minimum mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE), and the maximum coefficient of determination (R^2) (measures the model performance) values, with 4-7 neurons in hidden layers, and tansig, logsig, and purelin transfer functions. Also the maximum number of epochs were selected as 500. Network training data and simulated data were compared, in order to confirm the designed models.

4.2. Removal efficiency modeling with ANNs

In this presented work, a feedforward backpropagation network was constructed as network type. Many different transfer functions (logsig, tansig, and purelin) were used in the hidden layer, and the output transfer function “purelin” was used in the output layer. The Learngdm (used to calculate weight and bias learning function) function was used as the adaption learning function, and MAE and RMSE and R^2 were determined as the performance function. In Table 3, the network models were repeated with different neurons and transfer functions, and comparative results with simulated values, the coefficient of determination (R^2) belonging to these results, and MAE and RMSE values, are presented.

The model with the optimum performance was reached by changing the number of neurons in the hidden layer and the transfer functions. In Table 3, it can be seen that the most satisfactory results for feedforward backpropagation artificial neural network belong to the model in which the hidden layer has 5 neurons, and the transfer function is logsig. Similarly, Fig. 3 shows the network model tested using the simulated data that were not shown to the network.

Table 3. Results of ANN model for removal efficiency.

Number of neuron	Transfer function	Train (R ²)	Validation (R ²)	Test (R ²)	RMSE	MAE
4	Logsig	0,97	0,98	0,46	6,48x10 ⁻⁵	0,05720
	Tansig	0,99	0,99	0,43	6,04x10 ⁻⁴	56,3431
	Purelin	0,99	0,99	0,46	1,64x10 ⁻²	0,04280
5	Logsig	0,99	0,99	0,89	9,28x10⁻⁴	0,03787
	Tansig	0,99	0,99	0,10	7,40x10 ⁻⁴	0,10076
	Purelin	0,99	0,99	0,48	1,49x10 ⁻⁵	0,02949
6	Logsig	0,99	0,98	0,34	9,30x10 ⁻⁵	0,03951
	Tansig	0,99	0,99	0,45	7,43x10 ⁻⁴	0,04296
	Purelin	0,93	0,99	0,47	1,25x10 ⁻³	9,43880
7	Logsig	0,99	0,75	0,46	3,29x10 ⁻³	0,08710
	Tansig	0,99	0,99	0,43	1,25x10 ⁻³	0,04375
	purelin	0,83	0,98	0,45	1,80x10 ⁻²	0,03824

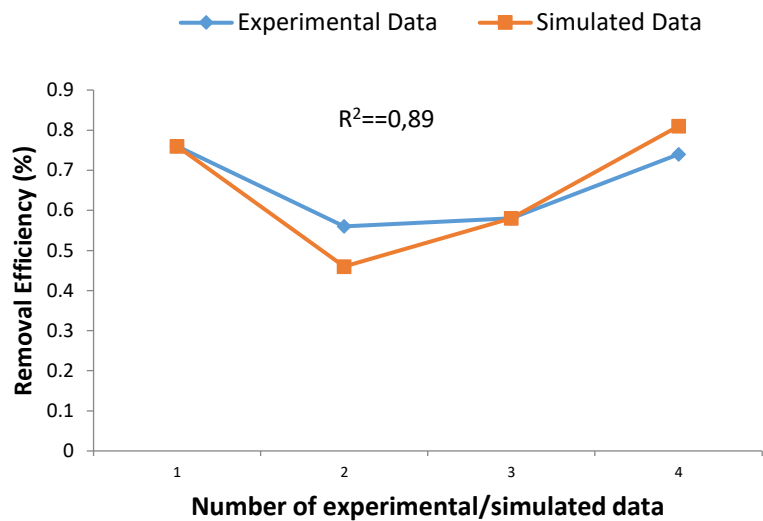


Figure 3. Simulated data and experimental data for removal efficiency

4.3. Sorption capacity modeling with ANNs

In Table 4, the results of the artificial neural network model, developed with different correlations for sorption capacity are shown.

Table 4. Results of neural network for prediction of sorption capacity.

Number of neuron	Transfer function	Train (R ²)	Validation (R ²)	Test (R ²)	RMSE	MAE
4	logsig	0,99	0,99	0,39	2,23x10 ⁻²	0,03558
	tansig	0,99	0,98	0,23	3,10x10 ⁻²	0,02590
	purelin	0,99	0,99	0,39	2,49x10 ⁻¹	0,18980
5	logsig	0,75	0,62	0,77	1,51x10 ⁻¹	0,11220
	tansig	0,98	0,99	0,99	3,07x10⁻⁶	0,01015
	purelin	0,99	0,99	0,58	2,66x10 ⁻³	0,02684
6	logsig	0,98	0,75	0,40	5,57x10 ⁻²	0,22100
	tansig	0,98	0,99	0,46	2,70x10 ⁻⁴	0,04343
	purelin	0,93	0,99	0,59	2,45x10 ⁻²	0,03670
7	logsig	0,93	0,63	0,86	9,01x10 ⁻¹	0,85900
	tansig	0,95	0,99	0,55	2,33x10 ⁻³	0,04267
	purelin	0,99	0,68	0,54	3,11x10 ⁻¹	0,28060

The model yielded more satisfactory results compared to removal efficiency. The R^2 values were found to be within the range of 0.10-0.89 for removal efficiency, whereas in the model belonging to sorption capacity, R^2 values were within the range of 0.23-0.99. The number of neurons in the optimum model was found to be 5, which was equal to the number of neurons in removal efficiency. However, the training function was determined as tansig. The MSE value was also found to be substantially lower compared to removal efficiency. The graph of the values produced by the network trained with the simulated values of the sorption capacity and the coefficient of determination, which was found as $R^2=0.99$, are shown in Fig. 4.

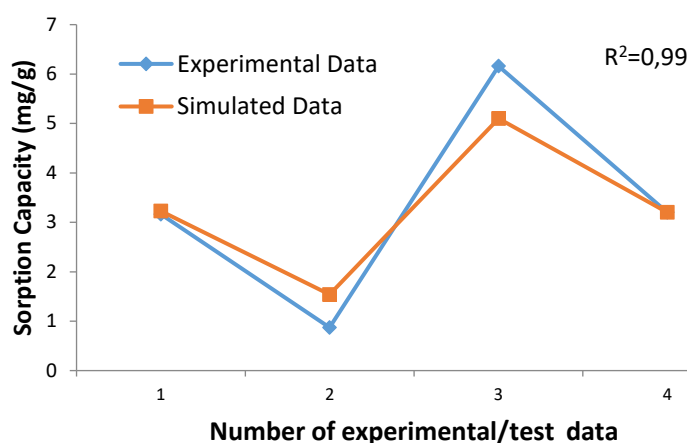


Figure 4. Simulated data and experimental data for Sorption Capacity

The increase of the coefficient of determination to 0.99 shows that the sorption capacity can be determined at a rate of 99 % with contact time, pH, initial concentration data and adsorbent dosage.

5. Conclusion

This study indicates that the Cr (VI) removal efficiency and sorption capacity of C[6]APS (polymer supported calixarenes) can be confidently modeled using the ANN technique. Although there have been many studies about using different adsorbents for the removal of Cr (VI) and modeling with ANN, there have been no studies about the use of polymeric calixarenes in an adsorption process modeled through ANN. Hence in this study is the use of polymeric calixarenes has been modeled through ANN for the first time in the process of adsorption. Before using the developed ANN model in a real sorption estimation, the training results should not be considered as sufficient, and should certainly be tested using the simulated values that are not shown to the network. It is necessary to have a high consistency between the simulated results and the experimental results, in order to obtain a satisfactory level of removal efficiency or sorption capacity. With this aim, experiments were conducted using different neuron numbers and transfer functions, to find the appropriate model. It was found that it would be appropriate to use the logsig transfer function with 5 neurons to estimate the most suitable removal efficiency, and to use the tansig transfer function with 5 neurons to estimate the sorption capacity. It was shown that the developed ANN models can be used in an efficient way and as a tool to predict in the computer-based removal efficiency and sorption capacity processes.

Acknowledgment

I thank Prof. Dr. Mustafa TABAKÇI for assistance and comments that greatly improved the manuscript.

References

- Aber, S., Amani-Ghadim, A., & Mirzajani, V. (2009). Removal of Cr (VI) from polluted solutions by electrocoagulation: Modeling of experimental results using artificial neural network. *Journal of hazardous materials*, 171(1-3), 484-490.
- Amani-Ghadim, A., & Dorraji, M. S. (2015). Modeling of photocatalytic process on synthesized ZnO nanoparticles: Kinetic model development and artificial neural networks. *Applied Catalysis B: Environmental*, 163, 539-546.
- Asfari, M.-Z., Böhmer, V., Harrowfield, J., & Vicens, J. (2007). *Calixarenes 2001*: Springer Science & Business Media.
- Azarpour, A., Alwi, S. R. W., Zahedi, G., Madooli, M., & Millar, G. J. (2015). Catalytic activity evaluation of industrial Pd/C catalyst via gray-box dynamic modeling and simulation of hydropurification reactor. *Applied Catalysis A: General*, 489, 262-271.
- Babaei, A. A., Khataee, A., Ahmadpour, E., Sheydaei, M., Kakavandi, B., & Alaei, Z. (2016). Optimization of cationic dye adsorption on activated spent tea: equilibrium, kinetics, thermodynamic and artificial neural network modeling. *Korean journal of chemical engineering*, 33(4), 1352-1361.

- Bounar, N., Boulkroune, A., Boudjema, F., & Farza, M. (2015). Adaptive fuzzy vector control for a doubly-fed induction motor. *Neurocomputing*, 151, 756-769.
- Chairez, I., García-Peña, I., & Cabrera, A. (2009). Dynamic numerical reconstruction of a fungal biofiltration system using differential neural network. *Journal of Process Control*, 19(7), 1103-1110.
- Dutta, S., Parsons, S. A., Bhattacharjee, C., Bandhyopadhyay, S., & Datta, S. (2010). Development of an artificial neural network model for adsorption and photocatalysis of reactive dye on TiO₂ surface. *Expert Systems with Applications*, 37(12), 8634-8638.
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *Journal of environmental management*, 92(3), 407-418.
- Fu, R.-Q., Xu, T.-W., & Pan, Z.-X. (2005). Modelling of the adsorption of bovine serum albumin on porous polyethylene membrane by back-propagation artificial neural network. *Journal of membrane science*, 251(1-2), 137-144.
- Gao, H., Liang, L., Chen, X., & Xu, G. (2015). Feature extraction and recognition for rolling element bearing fault utilizing short-time Fourier transform and non-negative matrix factorization. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 28(1), 96-105.
- Ghaedi, A., Ghaedi, M., & Karami, P. (2015). Comparison of ultrasonic with stirrer performance for removal of sunset yellow (SY) by activated carbon prepared from wood of orange tree: Artificial neural network modeling. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 138, 789-799.
- Gutsche, C. D. (2008). *Calixarenes: an introduction*: Royal Society of Chemistry.
- Halder, G., Dhawane, S., Barai, P. K., & Das, A. (2015). Optimizing chromium (VI) adsorption onto superheated steam activated granular carbon through response surface methodology and artificial neural network. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34(3), 638-647.
- Heaton, J. (2008). *Introduction to neural networks with Java*: Heaton Research, Inc.
- Heibati, B., Rodriguez-Couto, S., Ozgonenel, O., Turan, N. G., Aluigi, A., Zazouli, M. A., . . . Albadarin, A. B. (2016). A modeling study by artificial neural network on ethidium bromide adsorption optimization using natural pumice and iron-coated pumice. *Desalination and Water Treatment*, 57(29), 13472-13483.
- Kang, H. T., & Yoon, C. J. (1994). Neural network approaches to aid simple truss design problems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 9(3), 211-218.
- Khandanlou, R., Masoumi, H. R. F., Ahmad, M. B., Shameli, K., Basri, M., & Kalantari, K. (2016). Enhancement of heavy metals sorption via nanocomposites of rice straw and Fe₃O₄ nanoparticles using artificial neural network (ANN). *Ecological Engineering*, 91, 249-256.
- Kooh, M. R. R., Dahri, M. K., Lim, L. B., Lim, L. H., & Malik, O. A. (2016). Batch adsorption studies of the removal of methyl violet 2B by soya bean waste: isotherm, kinetics and artificial neural network modelling. *Environmental Earth Sciences*, 75(9), 783.
- Köhler, T., Bock, R., Hornegger, J., & Michelson, G. (2015). Computer-aided diagnostics and pattern recognition: Automated glaucoma detection *Teleophthalmology in Preventive Medicine* (pp. 93-104): Springer.
- Lertworasirikul, S., & Tipsuwan, Y. (2008). Moisture content and water activity prediction of semi-finished cassava crackers from drying process with artificial neural network. *Journal of food Engineering*, 84(1), 65-74.
- Li, W., Zhu, Z., Jiang, F., Zhou, G., & Chen, G. (2015). Fault diagnosis of rotating machinery with a novel statistical feature extraction and evaluation method. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 50, 414-426.
- Mahmoodi, N. M., Hosseinabadi-Farahani, Z., Bagherpour, F., Khoshrou, M. R., Chamani, H., & Forouzesfar, F. (2016). Synthesis of CuO–NiO nanocomposite and dye adsorption modeling using artificial neural network. *Desalination and Water Treatment*, 57(37), 17220-17229.
- Mahmoodi, N. M., Hosseinabadi-Farahani, Z., & Chamani, H. (2017). Dye adsorption from single and binary systems using NiO–MnO₂ nanocomposite and artificial neural network modeling. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(1), 111-119.
- McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4), 115-133.

- Nayak, P. C., Rao, Y. S., & Sudheer, K. (2006). Groundwater level forecasting in a shallow aquifer using artificial neural network approach. *Water resources management*, 20(1), 77-90.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1985). *Learning internal representations by error propagation*. Retrieved from
- Sato, A., Sha, Z., & Palosaari, S. (1999). Neural networks for chemical engineering unit operations. *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, 22(9), 732-739.
- Self, J. (1988). *Artificial intelligence and human learning: intelligent computer-aided instruction*: Chapman and Hall London.
- Sengupta, A. K., & Clifford, D. (1986). Important process variables in chromate ion exchange. *Environmental science & technology*, 20(2), 149-155.
- Tabakci, M. (2008). Immobilization of calix [6] arene bearing carboxylic acid and amide groups on aminopropyl silica gel and its sorption properties for Cr (VI). *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 61(1-2), 53-60.
- Todoran, R., Todoran, D., & Szakacs, Z. (2016). Optical luminescence studies of the ethyl xanthate adsorption layer on the surface of sphalerite minerals. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 152, 591-595.
- Tomczak, E. (2011). Application of ANN and EA for description of metal ions sorption on chitosan foamed structure—Equilibrium and dynamics of packed column. *Computers & chemical engineering*, 35(2), 226-235.
- Voyant, C., Nivet, M.-L., Paoli, C., Muselli, M., & Notton, G. (2015). Heterogeneous transfer functions multi-layer perceptron (MLP) for meteorological time series forecasting. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 6(02), 1550013.
- Yurtsever, U., Yurtsever, M., Şengil, İ. A., & Kıratlı Yılmazçoban, N. (2015). Fast artificial neural network (FANN) modeling of Cd (II) ions removal by valonia resin. *Desalination and Water Treatment*, 56(1), 83-96.
- Zhao, D., SenGupta, A. K., & Stewart, L. (1998). Selective removal of Cr (VI) oxyanions with a new anion exchanger. *Industrial & engineering chemistry research*, 37(11), 4383-4387.



Assessment of Mechanical and Thermal Properties of Juniperus Drupacea/Epoxy Biocomposite

Mustafa Taşyürek^{1*}  Sait Aras² 

¹Selçuk University, School of Civil Aviation, Department of Airframe and Powerplant Maintenance, 42130, Konya, TURKEY

²Selçuklu Vocational and Technical Anatolian High School, Motor-Driven Vehicle Technology Area Konya, TURKEY

Başvuru/Received: 30/01/2019

Kabul / Accepted: 10/09/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 27/09/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Abstract

This paper presents experimental data using estimated approach to determine some mechanical properties of epoxy matrix based composites. For this reason, the epoxy matrix was made composite with the powdered materials obtained from different parts of the juniperus drupacea seeds. In order to obtain a homogeneous structure ultrasonic mixing technique was preferred. As an experimental estimation approach, the Taguchi method that is an alternative way to characterize complex composite structures, to come from above the problems and to investigate the effects of test parameters-factors by performing a few experiments was used. In the study, the L9 Taguchi orthogonal array has been preferred. Based on some production conditions; bio-reinforcement material has lowered the average hardness value to 4.22 and formed a more soft structure in addition to improving the tensile strength value by 46% compared to the neat sample. Parametric study showed that; the most important parameter affecting hardness and tensile strength are the mixing time and reinforcement ratio, respectively.

Key Words

“Juniperus Drupacea, Analysis of Variance, Bio-composite, Taguchi Method, Mechanical and Thermal Properties”

1. Introduction

Drupacea is a species of Cupressaceae family. This family represents four subdivisions which were widely spread out and takes place in the family of juniperoidea. This family was located in Juniperus regulations and drupacea using in the juniperus section out following years it was supposed to be taken in Juniperus section. Dönmez (2005)

Drupacea is a tree growing in Mediterranean region with a sea level of 600-1750 metres. Kocakulak (2007) Height ranges of trees is between 10 to 20 m. Drupacea nuts ripen in two years have round shapes and they are green at the beginning. By the time Akkaya (2010) stated that it changes its color to purple and then to brown. Drupacea is an evergreen and dioecious tree. Also according to knowledge obtained from Karaca (2009), the nuts are about 20-25 mm in diameter.

The polymer composites are often preferred in various applications such as automotive, flooring, aviation, marine and yacht or underwater materials. In that sense, the composite material is expected to be at the top in respect for its thermal, mechanic and wearing affects. The additional reinforcing element to matrix is quiet important for the performance of composites. To strengthen the performance, carbon nanotube, nano-clay, micro or nano fiber, nano-metal powders are used beside glass, carbon, aramid and basalt fibers. (Kara and Kırıcı 2017, Morkavuk et all. 2018, Gemi et all. 2016) However, we come across ambiguity for human health as many nano materials aren't produced naturally. Some bio-composite plates were produced and carried to houses by using various agricultural waste products. Possible changes in the mechanical properties of epoxy have never been studied before in the case of reinforcing of Juniperus drupacea.

As a reinforcement element, peanut shell (Karaağaç 2013, Lamrani et all. 2017), cashew shell (Harini et all. 2018, Kasemsiri et all. 2015), cotton (Alomayri et all. 2014), cacao powder (Imoisili et all. 2013), coconut (Kuburi et all. 2017, Sarki et all. 2011), sun flower seeds (Mati-Baouche et all. 2014), palm (Saba et all. 2016), nut shell powder (Matejka et all. 2013), natural seeds/fibers and bark powders are chosen to be used [16-22]. (Johnson et all. 2005, Alavudeen et all. 2015, Jingqiang et all. 2004, Day et all. 2001, Jumaidin et all. 2016, Saba et all. 2016, Koçak & Mistik 2015)

Prabhakar et all. (2015) stated that, the production of natural plastic seems to be an important task of scientists. Many articles are in circulation about composite materials that artificially produced. In addition to mechanic and thermal features of bio-composite materials are under investigation. (Fernández et all. 2016, Borchani et all. 2015, Fernandes et all. 2015) However, most of the bio-composite to be in nature haven't been tried yet. One of them is drupacea is becoming important especially on the point of nutrition and it is searched for its physical structure and nutrition. Akbulut et all. 2008, Akıncı et all. 2004)

Drupacea can be found in great deal in nature although it is regional and is accessible without charge. The nuts can either be ground as a whole or as separated with outer skin and nuts without skin. That makes it easy to use as reinforcing materials in plastic. So, the Juniperus drupacea/epoxy bio-composite would be an interesting and unusual model to find a new bio-composite material. There are no data or study on the mechanical and thermal properties of Juniperus drupacea/epoxy bio-composite so far. For the purpose of reduced of negative environmental effects of plastics, for use as a reinforcing material was carried out to drupacea.

2. Materials & Method

2.1. Materials

As a matrix material LR 326 resin is selected and as for hardening LH 265 is used. Epoxy which that is used in high heat applications was provided from a manufacturer company in Turkey. Drupacea nut which that is a reinforcement material, are picked up as plant seeds through collection from the nature. The drupacea nut powder was made by mechanical process.

2.2. Powder Process

Drupacea nuts are collected from nature as dried in the sun. They were washed to get rid of dust and dirt on the nuts. Some of the nuts were skinned off with a knife and then skins and nuts were dried again. The production diagram of drupacea powder is given in Figure 1.

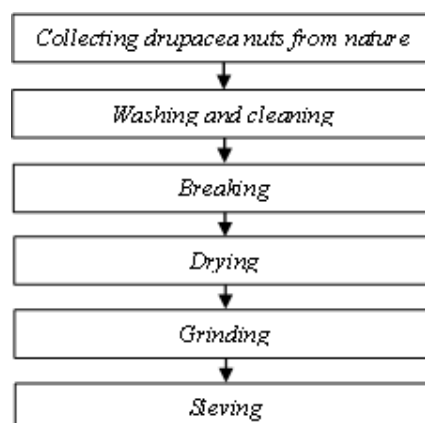


Figure 1. The production diagram of drupacea powder

The nuts were broken with hummer and then dried. After that, they were ground in the rod-mill to get powder. Finally, the powder was sieved in the thickness of $\leq 1\text{mm}$. Drupacea tree, its cone, nuts and powder were given Figure 2.



Figure 2. (a) Drupacea tree, (b) drupacea cone, (c) drupacea nut, (d) drupacea nut shell (e) drupacea powder

2.3. Bio-composites preparation

The percentages of additional material were varied 1%, 5%, 10%. The viscosity was reduced to obtain homogenizing before adding weighed powder materials to matrix. The additional dusts were mixed in matrix with ultrasonically. Mixing time was diversified to 5, 10, 15 minutes. To get rid of air bubbles the temperature was lowered and then the hardener was added. The hardener was stirred mechanically for five minutes. Finally, the mixture was placed inside an oven with iron mould for 1h at 80°C and 1h at 120°C . The samples taken from moulds and smoothed with sandpaper were prepared for usage according to ASTM D 638.

2.4. Taguchi / ANOVA Methods

In this study, the L9 orthogonal array (see Table 2) are applied for epoxy matrix reinforced with Juniperus Drupacea that is called as bio-composite material. Each experiment in the L9 array was repeated three times and the averages of the values were calculated. So, a minimized error was obtained. The effects of the three parameters have been studied for every level as shown in Table 1.

For the system with three factors and with three levels, a full factorial design with 27 experiments is required. However, after the repetition, 27 samples of 81 experiments will cause time and material losses. There are three factors are called A, B, and C. Letters represents reinforcing portion, reinforcing variety and mixture duration, respectively as seen in table 2.

In this study, the DOE procedure using Taguchi approach is implemented for the mechanical and thermal properties of previously unknown bio-composite materials produced via reinforced by Juniperus Drupacea. So, determination of optimum production parameters is very crucial to discover a new bio-composite material. The most important criteria for the Taguchi method is to determine the S/N portion in order to analyse the experimental data. In these works it was selected maximum S/N rate to determine samples produced in optimum conditions. S/N rate was calculated by using number (1) equation.

$$SNR = -\log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (1)$$

The values studied here are "n" the volume of noise factor, "yi" reaction variant.

Table 1. Parameters and levels

Levels/Factors	1	2	3
A- Reinforcement percentage (%)	1	5	10
B- Reinforcement variety	shell	nut	cone
C- Mixture duration (min.)	5	10	15

Table 2. L9 Experimental Design

Variables	A	B	C
A ₁ B ₁ C ₁	1	1	1
A ₁ B ₂ C ₂	1	2	2
A ₁ B ₃ C ₃	1	3	3
A ₂ B ₁ C ₂	2	1	2
A ₂ B ₂ C ₃	2	2	3
A ₂ B ₃ C ₁	2	3	1
A ₃ B ₁ C ₃	3	1	3
A ₃ B ₂ C ₁	3	2	1
A ₃ B ₃ C ₂	3	3	2

2.5. Mechanical Tests

For investigation the mechanical properties of bio-composite samples tensile tests were applied. Tests were performed according to relevant test standard ASTM D 638. Hardness values of the nanocomposites samples were evaluated by Vickers HRR hardness test device and these values are also given in Figure 6. The values reported are averages of three measured. The hardness measurement results were obtained from the bottom of the samples.

3. Results & Discussion

3.1. Tensile Tests

The result of tensile of samples produced in the method of Taguchi can be seen in figure 3 and figure 4. Drupacea and the other kinds are observed to change its epoxy values according to chart. On samples with better strength samples have higher strength values of drupacea nut shell powder and whole drupacea nut powders use samples produced with a long mixing time. The shorter the stirring the less resistible the sample is. That's because the reinforcing powders in the matrix aren't homogenized. Besides the samples in which drupacea nuts powders used often give low values. The drupacea nut powder particles are harder and rigid structure than other reinforcing components cause to keep its shape during mixing. As they keep its shape they don't have a large volume in the matrix. The drupacea shell powders, which are capable of doing the opposite and exhibiting more flexible properties, have shown a more ideal approach in terms of homogeneity. Therefore, increase of resistance and more elastic can be explained in that reason. The data obtained from Taguchi method proves this as well.

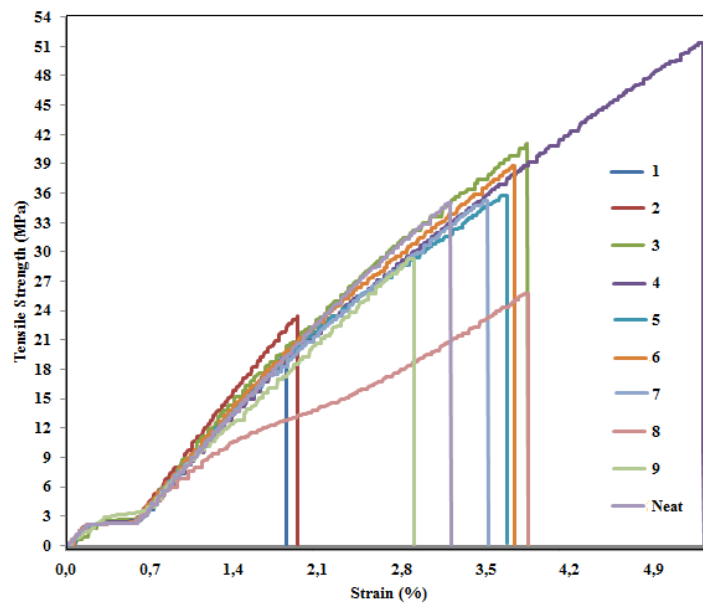


Figure 3. Stress-strain curves for neat and reinforced samples

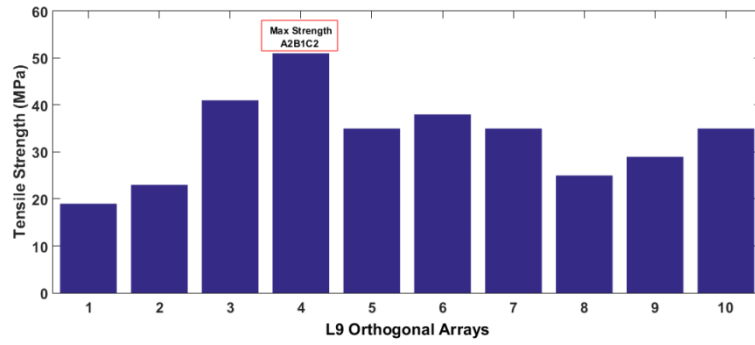


Figure 4. Tensile strength test results of all samples with L9 orthogonal arrays

Figure 5 shows the elasticity modulus of neat epoxy, and epoxy resin modified with Juniperus Drupacea and its different dusts. It is clearly seen that no increase was observed resulted in elasticity modulus modification. As seen in figure 5, the highest elasticity modulus among the modified samples is obtained when reinforcement 10 %, drupacea shell powder reinforcement and maximum stirring were used simultaneously. However, reinforced material's values haven't had a rise when compared with pure epoxy in elasticity values. Sample with number 7 shows quite simple increase. When we look at the production conditions we can see that the increase of reinforcing percentage and stirring can affect the elastic module positively. The use of whole drupacea cone powder seems to have an effect on decreasing the elasticity modulus due to the negative effect of the simultaneous distribution of the drupacea nut and drupacea nut shell powder in the matrices.

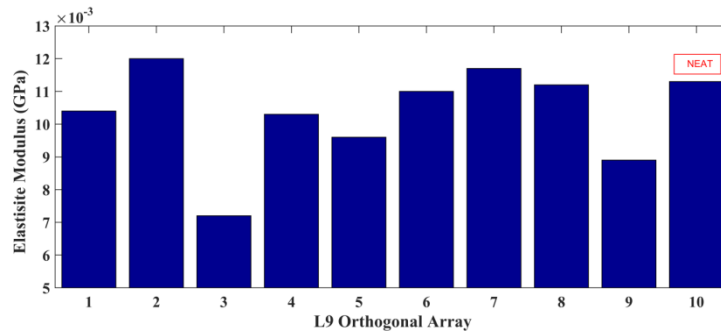


Figure 5. Elastic modulus test results of all samples with L9 orthogonal array

3.2. Hardness Test:

The hardness values are scaled in Rockwell R scale. Epoxies are a plastic material resistant to external effects with high strength and hardness. Reducing epoxy hardness with reinforcing materials, the consistency can be increased. According to hardness values; although the sample 2 shows near hardness values, all reinforcing materials when compared with epoxy hardness value came down. Although the use of drupacea nut powder resulted in a hardness value close to that of pure epoxy, the results were slightly lower. The use of drupacea nut shell powder and whole drupacea cone powder as reinforcing material further reduced the hardness value.

The decrease in hardness value in the majority of reinforced materials can be explained by the increased toughness. The stress-strain curves given in figure 3 are generally indicative of increased toughness of the composite samples, except some samples. The increase of the reinforcement ratio in the whole drupacea cone powder and drupacea nut shell powder used samples slightly increased the hardness value.

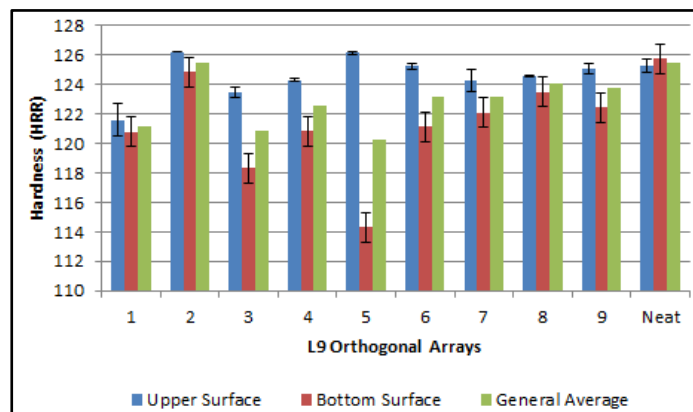


Figure 6. HRR hardness values of experimental specimens

3.3. Analysis of Variance

3.3.1. Evaluation for Tensile Tests

The average of S/N rate obtained from the experimental designs in table 3 is given in figure 7. The most important criterion in Taguchi method is to calculate S/N rates [9]. The optimum level of parameters in this study realizes in the highest point of S/N rates. The optimum production conditions are found for the best tensile values are given below. As seen in figure 7; 5% of 2nd level reinforcement (A₂), 3rd level the whole cone (B₃) of stirring level of 15 minutes (C₃) is the optimum design parameters for this experiment (A₂B₃C₃).

Table 3. Table of S/N values for stress values

Level/Factor	A	B	C
1	28,09	35,39	28,06
2	41,93	28,29	34,69
3	30,06	36,40	37,33
Δ	13,84	8,11	9,27

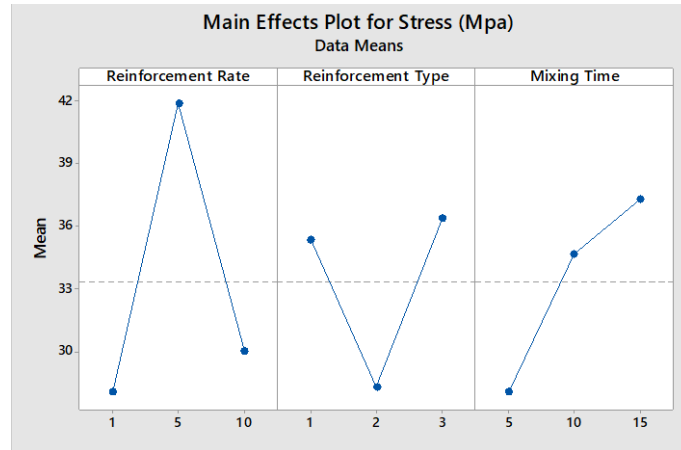


Figure 7. S/N graphic prepared for L9 array

The experimental results and predicted mechanical properties are shown in table 4. Each predicted results haven't gone out of borders of experimental results. According to results one can said, there is a close relationship between the values when the results of the test are compared with the predicted values of Taguchi approach.

Table 4. Predicted and experimental results of epoxy/ Juniperus drupacea nanocomposites from experiments

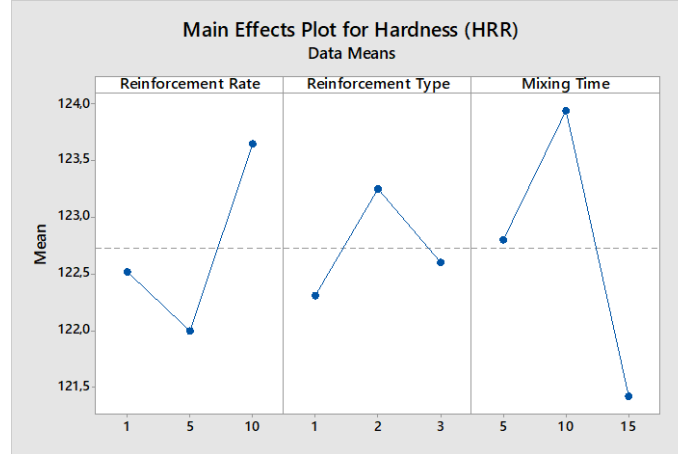
Properties	Estimated data	Test results
Tensile strength (MPa)	19.69 to 45.29	19.69 to 51.30
Strain at break (%)	1.51 to 4.58	1.16 to 5.31
Hardness	121.10 to 124.75	120.22 to 125.52
Elasticity Modulus (GPa)	0.008 to 0.011	0.007 to 0.012

3.3.2. Evaluation for Hardness Tests

It is seen that in previous research; participating reinforcement materials at very low ratio does not change tensile strength of the plastic matrix composites significantly. This situation is clearly seen in S/N ratio graphs. According to values between levels of the parameters (see Figure 8.), angle is steeper for mixing time parameter. This is evidence that the mixing time receives the first order in the effectiveness ranking on hardness. The most important factor for obtaining a homogeneously mixed composite material is mixing time. Δ values in the Table 5 also confirm this situation. Following mixing time, reinforcement rate takes second place in terms of efficacy. The reinforcement type has the least activity.

Table 5. Table of S/N values for hardness values

Level/Factor	A	B	C
1	122,52	122,30	122,80
2	121,99	123,25	123,94
3	123,65	122,60	121,41
Δ	1,66	0,95	2,53

**Figure 8.** Main Effect Plot for Hardness (HRR)

3.3.3. Interaction Plots

Relying on information assessment results of ANOVA program, interaction of production parameters was explained. The use of all types of reinforcing powders according to figure 9(a) increases the tensile strength of 1% samples. However, tensile strength value of samples with 5 and 10% is being more positively affected than drupacea nut shell powder usage. In Figure 9 (b), the 15-minute mixing time superior improves the tensile strength of samples with 1% and 10% reinforcement, and in 5% samples, these values peak at 10 minutes of mixing time. Figure 9 (c) and (d) shows the affection of reinforcing kind in orders with mixing rate and time, respectively.

It can be said that the use of whole cone powder is most favourably affected by the 1% reinforcement ratio, while the 5% reinforcement ratio is generally more dominant. It also appears that a 15 minute long mixing time increases the tensile strength in the use of drupacea nut powder and drupacea cone powder.

The values of the mixing time with respect to the reinforcing filler are similar to those of the reinforcing filler according to the reinforcement ratio. Also, usage of drupacea nut shell powder with 10 minute mixing time shows the much better effect. In general, the use of whole fruit powder seems to be more effective when the stress values of the samples produced for 5 and 15 minutes are examined.

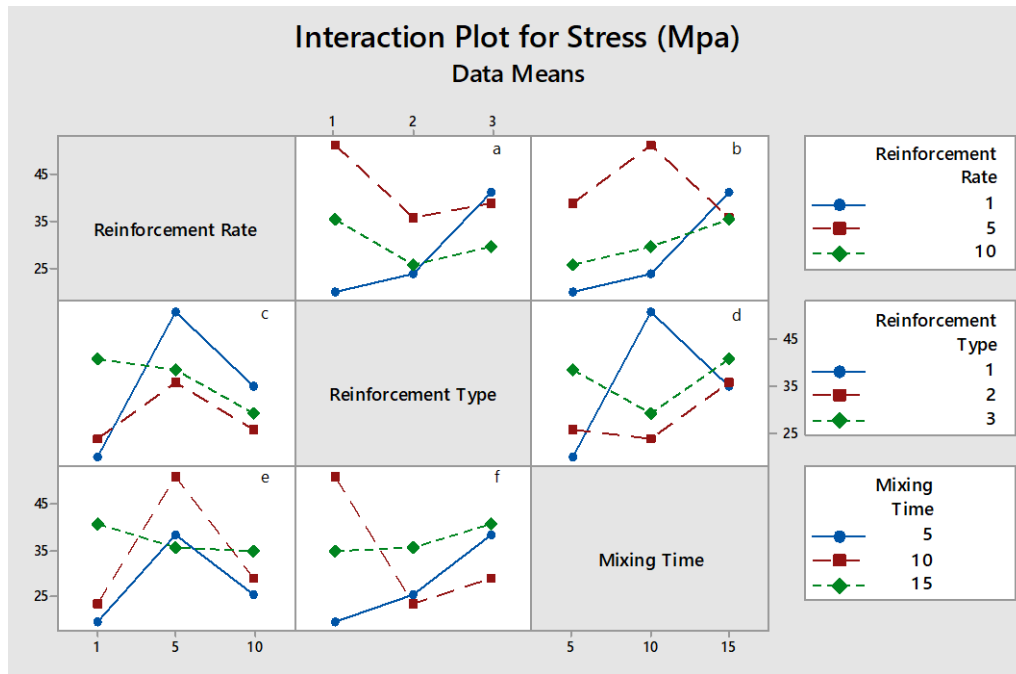


Figure 9. The results of interaction of all parameters of samples with each other (a) The state of being affected by the kind of the reinforcement ratio (b) The state of being affected by the mixing time of the reinforcement ratio (c) Influence of the reinforcement type on the reinforcement rate (d) Influence of the reinforcement type on the agitation time (e) Effect of the mixing time on the reinforcement rate (f) The influence of the mixing time on the reinforcement type

In figure 10 binary influences of parameters can be seen. In figure 10 we can see; drupacea nut shell powder and the whole drupacea cone powder have positive effect on hardness whereas the drupacea nut powder shows a linear effect. It gives highly hardness values so long as the reinforcing rate is kept stable in whole drupacea cone powders. But in lower reinforcement usage of drupacea nut powder it gives maximum result.

In figure 10 (b), it is seen how reinforcing powders are affected by mixing times and affect the hardness of drupacea/epoxy bio-materials. According to this, as the mixing time increases, the hardness values of the materials formed by the reinforcements in all ratios decrease. Although the maximum hardness value is measured from the sample obtained from the medium mixing period and the low-rate reinforcements, in general, the increase of the reinforcement ratio affects the hardness increasing direction. According to figure 10 (c); drupacea nut shell powder and whole drupacea cone powder from reinforcement types give close values at each reinforcement rate. Keeping the reinforcing rate at 10% it gave high hardness with no bound to reinforcing sort. In Figure 10 (d), the hardness values obtained from all the reinforcement ratios increase as the time from the low mixing time to the middle mixing time increases, but the hardness values of the samples obtained using the other reinforcement types except for the samples using drupacea nut shell powder are remarkably decreased at high mixing times. If the mixing time is kept stable, in lower and medium mixing time, drupacea nut powder gives high hardness values. The fact that drupacea nut has higher individual rigidity than drupacea nut shell leads to an increase in the stiffness of the biocomposite material. In figure 10 (e) and (f), it shows stable reinforcing rate and types the effect of stirring time on hardness. If high reinforcement ratio is preferred, hardness values close to each other are obtained. In other reinforcing rates, the increase of stirring time caused the decrease of hardness value. In addition, under lower and medium mixing times, drupacea nut powder strengthened the hardness.

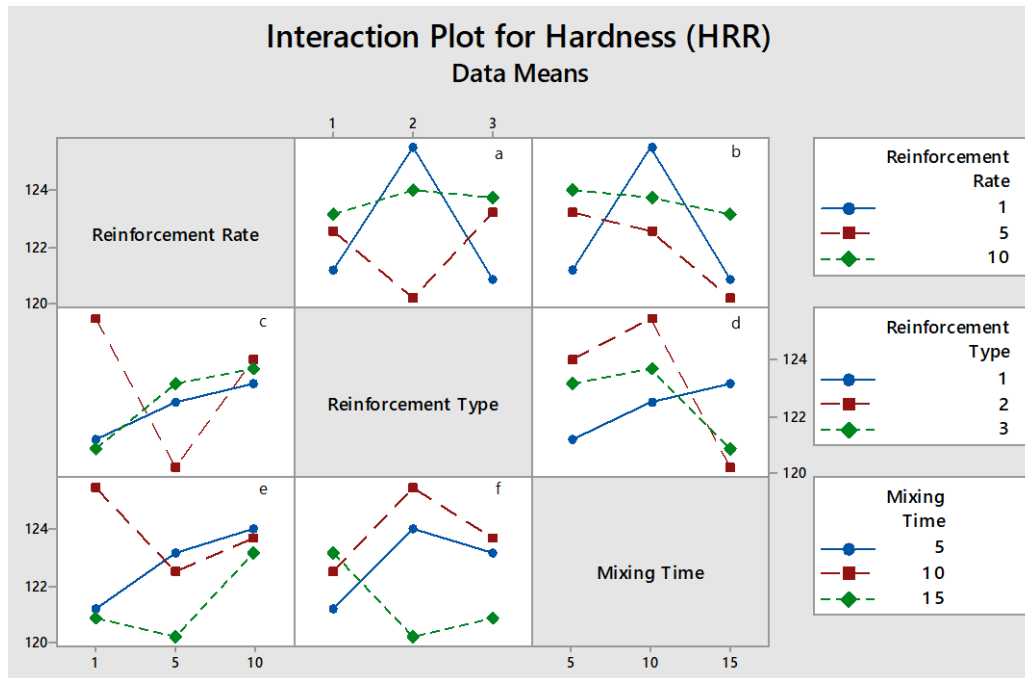


Figure 10. The results of interaction of all parameters of samples with each other (a) The state of being affected by the kind of the reinforcement ratio (b) The state of being affected by the agitation time of the reinforcement ratio (c) Influence of the reinforcement type on the reinforcement rate (d) Influence of the reinforcement type on the agitation time (e) Effect of the mixing time on the reinforcement rate (f) Effect of the mixing time on the reinforcement type.

4. Conclusions

A casting mould method has been used to prepare *Juniperus Drupacea*/epoxy biocomposites. The *Juniperus Drupacea* core, *Juniperus Drupacea* fruit shell and cone were dispersed separately into the matrix by ultrasonic technique. The following conclusions are derived from the above reported studies:

- In this work, good results in term of tensile strength have been obtained even using dust of different parts of *Juniperus Drupacea*.
- The hardness of matrix was reduced by strengthening the whole drupacea parts. By this way the material toughness was increased with some samples.
- The usage of whole drupacea and its shell tighten the tensile strength and elasticity module on the other hand the nut strengthens the hardness.
- Along the analysis program, optimum production conditions are A2B3C3 in order to increase the shrinkage resistance, this value for hardness is A3B2C2.
- When high reinforcement rate is preferred the resistance of material increases independently from reinforcing item.
- When compared experimental results with estimated results, there is a good proximity between values.
- Although reinforcing rate factor is very effective in respect of resistance value, stirring time played more dominant role for the hardness.

Acknowledgment

Thank you to Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mining Engineering and also, Assoc. Prof. Elif EREN GÜLTEKİN from Selcuk University, Faculty of Civil Aviation, Department of Airframe Engine Maintenance for their support.

References

Akbulut, M., Çoklar, H., & Özen, G., (2008). Rheological Characteristics of *Juniperus drupacea* Fruit Juice (pekmez) Concentrated by Boiling. *Food Science and Technology International*, 14, 321-328. <https://doi.org/10.1177/1082013208097193>

- Akıncı, I., Özdemir, F., Topuz, A., Kabaş, O., & Çanakçı, M., (2004). Some physical and nutritional properties of *Juniperus drupacea* fruits. *Journal of Food Engineering*, 65, 325–331. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.01.029>
- Akkaya, Z., (2010). Characterisation of the product obtained by drying of pekmez, MSc. dissertation, Ege University İzmir, TURKEY.
- Alavudeen, A., Rajini, N., Karthikeyan, S., Thiruchitrabalam M., & Venkateshwaren, N., (2015). Mechanical properties of banana/kenaf fiber-reinforced hybrid polyester composites: Effect of woven fabric and random orientation. *Materials & Design*, 66, 246-257. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.067>
- Alomayri, T., Shaikh F.U.A., & Low, I.M., (2014). Effect of fabric orientation on mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites”, *Materials & Design*, 57, 360–365. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.036>
- Borchani, K.E., Carrot C., & Jaziri, M., (2015). Biocomposites of Alfa Fibers Dispersed in the Mater-Bi® Type Bioplastic: Morphology, Mechanical And Thermal Properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 78, 371-379. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.023>
- Day, R.J., Lovell, P.A., & Wazzan, A.A., (2001). Toughened carbon/epoxy composites made by using core/shell particles. *Composites Science and Technology*, 61, 41-56. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00169-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00169-X)
- Dönmez, İ.E., (2005). Studies on the chemical compositions of syrian juniper (*Arceuthos drupacea* Ant. et. Kotschy), MSc dissertation, University of Zonguldak Karaelmas, Zonguldak, TURKEY.
- Fernández, J.A., Le Moigne, N., Caro-Bretelle, A.S., El Hage, R., Le Duc, A., Lozachmeur, M., Bono, P., & Bergeret, A., (2016). Role Of Flax Cell Wall Components On The Microstructure And Transverse Mechanical Behaviour of Flax Fabrics Reinforced Epoxy Biocomposites, *Cork–Polymer Biocomposites: Mechanical, Structural And Thermal Properties. Industrial Crops and Products*, 85, 93-108.
- Fernandes, E.M., Correlo, V.M., Mano, J.F., & Reis, R.L., (2015). Cork–Polymer Biocomposites: Mechanical, Structural and Thermal Properties. *Materials & Design*, 82, 282-289. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.040>
- Gemi, L., Kara, M., & Avci A., (2016) Low velocity impact response of prestressed functionally graded hybrid pipes. *Composites Part B: Engineering*, 106 (1), 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.025>
- Harini, K., Mohan, C.C., Ramya, K., Karthikeyan, S., & Sukumar, M., (2018). Effect of *Punica granatum* peel extracts on antimicrobial properties in Walnut shell cellulose reinforced Bio-thermoplastic starch films from cashew nut shells. *Carbohydrate Polymers*, 184, 231-242. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.12.072>
- Imoisili, P.E., Ezenwafor, T.C., Attah Daniel, B.E., & Olusunle, S.O.O., (2013). Mechanical Properties of Cocoa-Pod/Epoxy Composite; Effect of Filler Fraction. *American Chemical Science Journal*, 3(4): 526-531. DOI : 10.9734/ACSJ/2013/5526
- Johnson, M., Tucker, N., Barnes S., & Kirwan, K., (2005). Improvement of the impact performance of a starch based biopolymer via the incorporation of *Miscanthus giganteus* fibres. *Industrial Crops and Products*, 22, 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.08.004>
- Jingqiang, S., Yafeng, Z., Jindong, Q., & Jianzheng, K., (2004). Core-shell particles with an acrylate polyurethane core as tougheners for epoxy resins. *Journal of Materials Science*, 39 (20), 6383–6384. DOI: 10.1023/B:JMSC.0000043763.65417.4f
- Jumaidin, R., Sapuan, S.M., Jawaid, M., Ishak, M.R., & Sahari, J., (2016). Characteristics of thermoplastic sugar palm Starch/Agar blend: Thermal, tensile, and physical properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 89, 575-581. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.05.028>
- Kara, M., & Kırıcı, M., (2017). Effects of the number of fatigue cycles on the impact behavior of glass fiber/epoxy composite tubes. *Composites Part B: Engineering*, 123, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.04.021>
- Karaca, İ., (2009). Determination of vitamin and mineral in fruit juice concentrates, MSc dissertation, İnönü University, Malatya, TURKEY.
- Karağaç, B., (2013). Use of Ground Pistachio Shell as Alternative Fillerin Natural Rubber/Styrene–Butadiene Rubber-Based Rubber Compounds. *Polymer Composites*, 35, 2. 245-252. <https://doi.org/10.1002/pc.22656>
- Kasemsiri, P., Neramittagapong A., & Chindaprasirt, P., (2015). Effect of cashew nut shell liquid on gelation, cure kinetics, and thermomechanical properties of benzoxazine resin. *Thermochimica Acta*, 600, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.03.020>

- Kocakulak, E., (2007). Researches on the essential oils of *Juniperus drupacea* Lab., Ph.D. dissertation, Gazi University, Ankara, TURKEY.
- Koçak, D., & Mistik, S.I., (2015). The use of palm leaf fibres as reinforcements in composites. *Biofiber Reinforcements in Composite Materials*, 1st Ed., (pp. 273–281), Woodhead Publishing, Chapter 9, İstanbul,
- Kuburi, L.S., Dauda, M., Obada, D.O., Umaru, S., Dodoo-Arhin, D., Iliyasu, I., Balogun, M.B., & Mustapha, S., (2017). Effects of Coir Fiber Loading on the Physio-mechanical and Morphological Properties of Coconut Shell Powder Filled Low Density Polyethylene Composites. *Procedia Manufacturing*, 7, 138-144. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.036>
- Lamrani, M., Laaroussi, N., Khabbazi, A., Khalfaoui, M., Garoum, M., & Feiz, A., (2017). Experimental study of thermal properties of a new ecological building material based on peanut shells and plaster. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 294-304. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.09.006>
- Matejka, V., Fu, Z., Kukutschová, J., Qi, S., Jiang, S., Zhang, X., Yun, R., Vaculík, M., Heliová, M., & Lu, Y., (2013). Jute fibers and powderized hazelnut shells as natural fillers in non-asbestos organic non-metallic friction composites. *Materials & Design*, 51, 847–853. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.079>
- Mati-Baouche, N., De Baynast, H., Lebert, A., Sun, S., Lopez-Mingo, C.J.S., Leclaire, P., & Michaud, P., (2014). Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulating bio-based composite made from sunflower stalks particles and chitosan. *Industrial Crops and Products*, 58, 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.04.022>
- Morkavuk, S., Köklü, U., Bağcı, M., & Gemi, L., Cryogenic machining of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites and the effects of cryogenic treatment on tensile properties: A comparative study. *Composites Part B: Engineering*, 147, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.024>
- Prabhakar, M.N., Shah, A.R., Chowdoji Rao, K., & Song, J.I., (2015). Mechanical And Thermal Properties of Epoxy Composites Reinforced With Waste Peanut Shell Powder As A Bio-Filler. *Fibers and Polymers*, 16, 5. DOI: 10.1007/s12221-015-1119-1
- Saba, N., Paridah, M.T., Abdan, K., & Ibrahim, N.A., (2016). Effect of oil palm nano filler on mechanical and morphological properties of kenaf reinforced epoxy composites. *Construction and Building Materials*, 123, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.131>
- Saba, N., Paridah, M.T., Abdan K., & Ibrahim, N.A., (2016). Physical structural and thermomechanical properties of oil palm nano filler/kenaf/epoxy hybrid nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*, 184, 64-71. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2016.09.026
- Sarki, J., Hassan, S.B., Aigbodion V.S., & Oghenevweta, J.E., (2011). Potential of using coconut shell particle fillers in eco-composite materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 2381–2385. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.11.025>



Asfalt Yolların Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi: İstanbul O3 Otoyolunda Uygulanması

Life Cycle Cost Analysis of Asphalt Roads: Case Study on Istanbul O3 Motorway

İbrahim Altan Karahacıoğlu¹, Adnan Corum^{*2}

¹ Bayrampaşa Belediyesi, İmar ve Şehircilik Müdürlüğü,, 34030 İstanbul, TÜRKİYE

² Bahçeşehir Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34353 İstanbul, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 18/03/2019

Kabul / Accepted: 24/09/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 27/09/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Ülkemizde, önemli yatırım maliyetlerin başında asfalt yollar gelmektedir. Yatırım kararı alınırken, asfalt yolların imalatından, kullanım süresi sonuna kadar geçen süreçte yapılan tüm faaliyetler ele alınmalıdır. Projenin yatırım, bakım & onarım ve hurda değerleri hesaplanmalıdır. Bu çalışmada, İstanbul O3 otoyolunun üstyapısının, yatırım, bakım & onarım ve hurda maliyetlerinin net bugünkü değeri hesaplanarak yaşam döngüsü maliyet analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Asfalt, yaşam döngüsü maliyet analizi, net bugünkü değer”

Abstract

In our country, asphalt roads are the major investment costs. When making an investment decision, all activities carried out from the production of asphalt roads to the end of its life should be considered. Investment, maintenance & repair, and scrap values of the project should be calculated. In this study, life cycle cost analysis was performed by calculating the net present value of investment, maintenance & repair, and scrap costs of the top layer of Istanbul O3 motorway.

Key Words

“Asphalt, life cycle cost analysis, net present value”

1. Giriş

Günümüz gelişen ve değişen teknolojik gelişmelerin ışığında, bir üretimin yatırıma dönüşme kararını verebilmek, kişi ya da kuruluşlar için çok önemlidir. Bu alınan kararların özellikle sosyal ve ekonomik alanlarda alınacak olması, modern teknik yaklaşımlara başvurulmasını da zorunlu hale getirmiştir.

Ülkemizde yolcu taşımacılığının %97'si, yük taşımacılığının ise %89'u karayoluyla gerçekleştirilmektedir (Çetin vd., 2011). 1900'lerde petrol rafinerilerinin artmasıyla asfalt kaplama endüstrisinin gelişmeye başlaması, asfalt üstyapı karışım sistemleri hakkında çalışmaların başlamasına neden olmuş ve bu karışım tasarımları geliştirilerek gün geçtikçe kullanımları yaygınlaşmıştır (Öztürk ve Çabuk, 2004). Ülkemizde ilk kez 1929 yılında anayollara asfalt yol yapma uygulamasına geçilmiştir (Çetin vd., 2011). Türkiye'de özellikle İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra karayolu yapımına öncelik verilmiştir. 1950 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü kurulmuştur. Bu dönemle birlikte uygulanan karayolu ağırlıklı ulaşım politikaları sonucunda karayolları, ulaşım sistemleri arasında ilk sıraya yerleşmiştir (Şefik ve Eser, 2016). Yollardaki aşınma tabakası (en üst tabaka) yol güvenliği açısından en önemli parametrelerden birini oluşturur (Akbulur ve Güreer, 2006).

Ülkemizin önemli maliyetlerden biri de asfalt yol yapımıdır. Ülkemiz yolları, Mayıs 2016 itibarı ile 20000 km'ye yakını asfalt betonu, 40000 km'den fazlası ise sathi kaplama yoldur. Ayrıca, 2015 yılı için 2,60 Milyar \$'ı aşan bir bütçeye sahiptir. Böylesine dev bir bütçeye sahip olan bir ekonomide alınacak kararlar elbette ki gelişen ve değişen teknolojinin ışığında modern teknik analizlerle yapılmalıdır.

Bu çalışmada, asfalt yol yapımının önemli bir yatırım maliyet kısmını oluşturan yol üstyapı tasarımından yola çıkarak, İstanbul ili, 8,70 km uzunluğundaki O3 Otoyolu Vatan Caddesi Kavşağı- Mahmutbey Doğu Kavşağı Arası Bağlantı Yolu (O3 Bağlantı Yolu) için Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi (YDMA) yapılmıştır.

Çalışmanın 2. bölümünde asfalt, yol üstyapısı, asfalt yol bakım & onarım yöntemi ve önemi hakkında bilgilendirme yapılmıştır. 3. bölümde O3 Bağlantı Yolu için YDMA uygulanmıştır. Yatırım, bakım & onarım verileri yanı sıra, hurda maliyetleri ve yıllık faiz oranı ele alınarak, projenin faizli ortamda Net Bugünkü Değeri (NBD) hesaplanmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2. Asfalt ve Yol Üst Yapısı

Yol gövdesi, altyapı ve üstyapı olmak üzere iki kısımdan oluşur. Altyapı yarma ve dolguları içerir. Üstyapı ise trafik yüklerini taşıyan ve azaltarak altyapıya aktaran tabakalı bir yapıdır. Üstyapılar, tabakalardan kullanılan malzemelerin özelliklerine göre esnek, rijit ve yarı rijit olmak üzere üçe ayrılırlar (Orhan, 2012). Tablo 1'de üstyapı tabaka kesitleri verilmiştir.

Tablo 1. Üstyapı Tabaka Kesitleri

Rijit	Yarı-Rijit	Esnek
Beton plak	Kaplama tabakası	Kaplama tabakası
	Temel	Temel
Temel tabakası	Alt temel	Alt temel
		Üstyapı tabanı (dolgu/yarma)
		tesviye yüzeyi
Taban	Taban	Taban

Asfalt yollar, maliyeti yüksek her malzeme gibi belirli zamanlarda önleyici bakım & onarımlara ihtiyaç duymaktadır. Bu bakım & onarımlar ileride daha yüklü bir maliyetle karşı karşıya kalınmaması ve ekonomik ömrün uzatılması sebebiyle son derece önemlidir. Asfalt yolların ekonomik ömrü 20-40 yıl arasında değişebildiği, hatta düzenli ve planlı bir bakım & onarım yapıldığı takdirde bu yolların ekonomik ömrünün daha da uzadığı bilinmektedir.

Asfalt yolların bozulmasının nedenleri birçok etmene bağlı olarak küçük ve büyük tahribatlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu etmenleri şu şekilde sıralayabiliriz: Üretim ve uygulama aşamalarında, yol üst yapı tasarımının hatalı dizayn edilmesi, asfalt üretiminde kullanılan agrega malzemenin özelliği ve granülometresinin uygun olmaması, bitüm oranının az yada çok olması, temel kalınlıklarının uygun dizayn edilmemesi, sıcak karışım asfaltın uygun sıcaklıkta serilememesi, yol altyapısının uygun malzeme ile dolgusunun yapılamaması, yol üst yapı malzemelerinde sıkışmanın yapılmaması, eksik yada hatalı serim yapılmasının yanı sıra üretim ve uygulama sonunda, yasal dingil ağırlıklarının değiştirilmesi, araçların yasal limit üstü yük yüklemeleri, yol bakım & onarımların zamanında yapılamaması ve yol bakım & onarımlarına öngörülebilir bir mali kaynak ayırmak için bilimsel bir onarım ve bakım kaydı tutulamaması gibi (teknomaccaferri.com).

Asfalt yollarda bakım & onarım metotları üç gruba ayrılır. Tablo 2'de bu metotları uygulama yöntemleri gösterilmiştir (academia.edu).

Tablo 2. Üstyapı Bakım & Onarım Metotları ve Uygulamaları

Bakım	Onarım	Yeniden Yapım
Yamalar	Asfalt kaplamanın yeniden kullanımı	İmalatın yeniden yapılması
Çatlak dolgusu	Aşınma tabakasının yenilenmesi	
Asfalt koruyucu sathi kaplama	Geosentetik malzeme kullanılması	
Harç tipi kaplama	Takviye tabakası getirilmesi	

YDMA, bu noktada öngörülemez bakım & onarım maliyetlerini de hesaba katarak, bir yolun sadece yatırım maliyeti ile ilgilenemeyip, yolun ömrünün sonuna kadar olan yaşamsal (yok oluşuna kadar) faaliyetinin maliyeti ile ilgilenir. Öngörülemez maliyetleri tespit ederek, bir yatırımın yapılabilmesinde karar verilme aşamasında ya da sonrasında fikir sunar. Bir tasarımın üretim, yatırım, enerji, performans değerlendirme ve ekonomi gibi konularda, ana maliyetlerin yanı sıra işletme, bakım & onarım gibi maliyetlerini de içererek alternatif tasarım kararlarını değerlendirmek için yapılan bir analiz metodudur.

İstanbul ili, O3 Otoyolu Vatan Caddesi Kavşağı- Mahmutbey Doğu Kavşağı Arası Bağlantı Yolu'na ait parametreler Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. O3 Bağlantı Yolu Ana Parametreler

Tabakalar	Kalınlık (cm)	Yoğunluk (ton/m ³)	Yol uzunluğu (m)	Yol genişliği (m)	Miktar (ton)
Aşınma	5	2,40	8700	30	31320
Binder	7	2,40	8700	30	43848
Plentmiks T.	25	2,36	8700	32	164256
Alttemel	25	2,26	8700	32	157296

3. Maliyet Hesaplamaları

O3 Bağlantı Yolu ile ilgili olarak; yatırım, bakım & onarım ve hurda maliyetleri üç başlık halinde hesaplanmıştır. Bir yolun yatırım maliyeti içerisinde; yol alt yapı ve yol üst yapı çalışmaları gibi yolların yapımında yatırım maliyet kalemleri olarak birçok kalem bulunmaktadır. Ancak yolların bakım & onarımında yol üst yapısında bakım & onarım esas kriter olarak göz önünde bulunulduğundan bu çalışmada yatırım maliyetleri yol üst yapısı göz önüne alınarak yapılmıştır.

3.1. Yatırım maliyeti

Yatırım Maliyetlerini üçe ayrılarak Plentaltı Malzeme Fiyatları, Nakliye ve İşçilik olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar 2015 fiyatlarına göre ve Yüklenici Karı (%25) alınarak hesaplanmış olup, güncel pozlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB) poz fiyatları, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) poz fiyatları ve piyasa fiyatları verilerinden elde edilmiştir. Tablo 4'de hesaplamalar gösterilmiştir.

Tablo 4. Yatırım Maliyeti

TABAKALAR	Plentaltı Malzeme Fiyatı (TL/ton)	Nakliye Maliyeti (TL/ton)	Binder ve Aşınma İşçilik Maliyeti (TL/ton)	Plentmiks ve Alttemel İşçilik Maliyeti (TL/ton)	Miktar (ton)	Yatırım Maliyeti (TL)
Aşınma	87	8,77	8,63	-	31320	3269808
Binder	78	8,77	8,63	-	43848	4183099
Plentmiks T.	23	8,77	-	7,73	164256	6488112
Alttemel	21	8,77	-	7,73	157296	5898600
					Toplam=	19839619

3.2. Bakım & onarım maliyeti

Yol bakım & onarım araştırmalarında, yolun cinsi, yol dizaynı, yoldan geçen taşıt sayısı, mevsimsel hava şartları gibi birçok etmen yol bakım & onarımında önemli rollere sahiptir. O3 Bağlantı Yolu gibi tasarıma sahip bir yolda, yol üstyapısına ait bakım & onarım maliyetleri, bozulmuş yolun durumu ve ekonomik kaynaklar doğrultusunda her yıl değişiklik göstermekle birlikte, bakım & onarım maliyetleri daha çok üstyapı katmanlarından olan aşınma tabakasında gerçekleşmektedir. Aşınma tabakasında ve yer yer binder tabakasında yapılan yıllık bakım & onarım maliyetlerinin çok büyük bir kısmı asfalt robotu ile yama yapılması şeklinde yapılmaktadır. Yamada kullanılan malzeme daha çok Tip-1 veya Tip-2 aşınma asfalt tabakası şeklindedir.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Avrupa Yol Bakım & Onarım Müdürlüğü'nden alınan geçmiş yıllara ait veriler doğrultusunda, her yıl değişen onarım ve bakım maliyetleri O3 Bağlantı yolu gibi tasarıma sahip bir yolda yılda ortalama 400 ton asfalt robotu ile yama çalışması yapıldığı görülmüştür. Ayrıca, belirli yıllarda çalışma yapılmamakla birlikte, 2008-2014 yılları arasında toplamda 35195 ton aşınma tabakası yenileme çalışması yapıldığı görülmüştür. Bu değer O3 bağlantı yolunda kullanılacak aşınma tabakası malzeme miktarı olarak kabul edilmiştir.

Bunun yanı sıra, yol yüzeyinde meydana gelen yapısal ve yapısal olmayan çatlak bakımlarıyla ilgili olarak aylık bakımlar yapılmakta olup, bu çalışma ile ilgili herhangi bir analiz çalışmasına rastlanılmamıştır. Ancak, bu çalışmada; istatistiksel ve deterministik bir yaklaşımla çatlak bakımı için bir analiz çalışması yapılmıştır. Özetle, bu çalışmada yol bakım & onarım maliyeti 3 gruba ayrılmıştır: (1) Çatlak bakım maliyeti, (2) Asfalt robotu ile yama yapılması maliyeti, (3) Aşınma tabakası yenilenmesi maliyeti

Çatlak Bakım Maliyeti: Çatlak bakım maliyeti için, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Avrupa Yol Bakım ve Onarım Müdürlüğü ile İstanbul İli, Bayrampaşa Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğü'nden alınan bilgiler neticesinde analiz yapılmış olup, yıllık çatlak bakım maliyeti 24047 TL olarak hesaplanmıştır.

Asfalt Robotu ile Yama Yapılması Maliyeti: Asfalt robotu ile yama yapılması maliyet analizi yedi farklı maliyet grubu ele alınarak çıkartılmıştır ve aşağıda sıralanmıştır:

1. Asfalt Kesilmesi Birim Maliyeti
2. Kırmataş, Şose ve Asfalt Sökülmesi Birim Maliyeti
3. Şantiye Dışına Kamyonla Kazı Malzemesi ve Moloz Nakli Birim Maliyeti
4. Katyonik Asfalt Emülsiyonu (CRS-1 Tipi) Uygulama Birim Maliyeti
5. Plentaltı Aşınma Birim Maliyeti
6. Aşınma tabakası Nakliye Birim Maliyeti
7. Asfalt Robotu ile Yama Yapılması İşçilik Birim Maliyeti

Bu maliyetler, pozlar ve analiz çalışmaları neticesinde Tablo 5 de gösterilmiştir.

Tablo 5. Asfalt Robotu ile Yama Yapılması Birim Maliyeti

	Birim Maliyetler	Yardımcı Poz ve İşlem	Tutar (TL/ton)
1	Asfalt Kesilmesi Birim Maliyeti	İller Bankası (18.190/İB-1) ve Analiz Çalışması	15,51
2	Kırmataş, Şose ve Asfalt Sökülmesi Birim Maliyeti	Devlet Su İşleri (18.190)	16,48
3	Şantiye Dışına Kamyonla Kazı Malzemesi ve Moloz Nakli Birim Maliyeti*	ÇŞB (07.006)	17,46
4	Katyonik Asfalt Emülsiyonu (CRS-1 Tipi) Uygulama Birim Maliyeti	ÇŞB (04.611/1A, 01.501) ve Analiz Çalışması	2,39
5	Plentaltı Aşınma Birim Maliyeti	Tablo 4	87,00
6	Aşınma tabakası Nakliye Birim maliyeti	Tablo 4	8,77
7	Asfalt Robotu ile Yama Yapılması İşçilik Birim Maliyeti	Analiz Çalışması	89,35
		Genel Toplam=	236,96

* Moloz malzemenin döküm sahası İçtaç Moloz ve Hafriyat Döküm Sahası olarak seçilmiş ve ortalama taşıma mesafesi 40 km olarak hesaplanmıştır.

O3 Bağlantı yolu, bakım & onarım maliyeti yapımında yılda ortalama 400 ton asfalt robotu ile yama yapıldığından yıllık toplam asfalt robotu ile yama yapılması maliyeti $236,96 * 400 = 94784$ TL olarak hesaplanır.

Aşınma Tabakası Yenilenmesi Maliyeti: Öngörümüz doğrultusunda 7 yılda bir kez yapılacak olan çalışma yıllık yapılan bakım & onarım çalışmalarından daha kapsamlı bir çalışmadır. Maliyet detayları Tablo 6' da gösterilmiştir.

Tablo 6. Aşınma Tabakası Yenilenmesi Maliyeti

	Birim Maliyetler	Yardımcı Poz ve İşlem	Tutar (TL/ton)
1	Yeni Asfaltın (Aşınma Tabakası) Serim Birim Maliyeti	Tablo 5 (plentaltı+nakliye+işçilik)	104,4
		Genel Toplam=	104,4

O3 bağlantı yolunda kullanılan aşınma tabakası malzeme miktarı Tablo 4’de 31320 ton olarak gösterilmiştir. Toplam aşınma tabakası yenileme maliyeti $104,4 \times 31320 = 3269808$ TL olarak hesaplanır.

3.3. Hurda maliyeti

Yorulmuş ve yaşlanmış asfaltların kazılarak yeniden kaliteli asfalt haline dönüştürülüp ekonomiye kazandırılması her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Bu konudaki teknolojiler de durmadan değişim göstermektedir. Hurda değer kavramı, analiz yapılan ürünün ömrü boyunca atık olarak kullanılabilen ve ömrü sonundaki değerini tanımlamaktadır. Yapılan araştırmalarda asfalt üretiminde, geri dönüşümde kullanılan aşınma ve binder tabakalarının, asfalt geri dönüşümünde %15 ile %20 oranında, plentmiks ve alttemel tabakalarının geri dönüşümünde %30 ile %50 arasında tasarruf sağladığı görülmektedir.

Bu çalışmada, aşınma tabakasının geri dönüşümdeki katkısının %15, binder tabakasında ise %20 ve plentmiks tabakasının %30, alttemel tabakasının %40 katkı sağladığı kabul edilmiştir. Bununla birlikte hurda maliyeti ise 4 farklı maliyet grubunda ele alınmıştır: (1) Aşınma Tabakası Hurda Maliyeti, (2) Binder Tabakası Hurda Maliyeti, (3) Plentmiks Temel Hurda Maliyeti, (4) Alttemel Hurda Maliyeti.

Aşınma tabakası hurda maliyeti: Ömrünü tamamlamış olan yolun kazılması, Habibler Fabrikası’na nakledilmesi ve aşınma tabakasının geri dönüşümde %15 tasarruf sağladığı kabul edilmiştir.

Bu maliyetler, pozlar ve analiz çalışmaları neticesinde Tablo 7’ de gösterilmiştir.

Tablo 7. Aşınma Tabakası Hurda Maliyeti

	Birim Maliyetler	Yardımcı Poz ve İşlem	Tutar (TL/ton)
1	Hurda Geri Kazanım (Plentaltı Aşınma Birim Maliyeti $\times 0,15$)= $87,00 \times 0,15 = 13,05$	Tablo 4	-13,05
2	Şantiye Dışına Kamyonla Kazı Malzemesi ve Moloz Nakli Birim Maliyeti	Tablo 4	8,77
3	Asfalt Kazıma Makinesi İle Her Cins Bitümlü Karışım Kaplamaların Kazılması	KGM (40.130)	24,45
Genel Toplam=			20,17

O3 bağlantı yolunda kullanılan aşınma tabakası malzeme miktarı Tablo 4’de 31320 ton olarak gösterilmiştir. Toplam aşınma tabakası hurda maliyeti $20,17 \times 31320 = 631724$ TL olarak hesaplanır.

Binder tabakası hurda maliyeti: Ömrünü tamamlamış olan yolun kazılması, Habibler Fabrikası’na nakledilmesi ve binder tabakasının geri dönüşümde %20 tasarruf sağladığı kabul edilmiştir.

Bu maliyetler, pozlar ve analiz çalışmaları neticesinde Tablo 8’ de gösterilmiştir.

Tablo 8. Binder Tabakası Hurda Maliyeti

	Birim Maliyetler	Yardımcı Poz ve İşlem	Tutar (TL/ton)
1	Hurda Geri Kazanım (Plentaltı Binder Birim Maliyeti $\times 0,20$)= $78,00 \times 0,20 = 15,60$	Tablo 4	-15,60
2	Şantiye Dışına Kamyonla Kazı Malzemesi ve Moloz Nakli Birim Maliyeti	Tablo 4	8,77
3	Asfalt Kazıma Makinesi İle Her Cins Bitümlü Karışım Kaplamaların Kazılması	KGM (40.130)	24,45
Genel Toplam=			17,62

O3 bağlantı yolunda kullanılan binder malzeme miktarı Tablo 4’ de 43848 ton olarak gösterilmiştir. Toplam binder tabakası hurda maliyeti $43848 \times 17,62 = 772602$ TL olarak hesaplanır.

Plentmiks Temel Tabakası Hurda Maliyeti: Ömrünü tamamlamış olan yolun kazılması, Habibler Fabrikası’na nakledilmesi ve plentmiks temel tabakasının geri dönüşümde %30 tasarruf sağladığı kabul edilmiştir.

Bu maliyetler, pozlar ve analiz çalışmaları neticesinde Tablo 9’ da gösterilmiştir.

Tablo 9. Plentmiks Temel Tabakası Hurda Maliyeti

	Birim Maliyetler	Yardımcı Poz ve İşlem	Tutar (TL/ton)
1	Hurda Geri Kazanım (Plentaltı Plentmiks Birim Maliyeti×0,30)= 23,00*0,30= 6,90	Tablo 4	-6,90
2	210 HP'lik Ekskavatörün 1 ton Plentmiks Malzemesini Kazı Yükleme ve Boşaltması	KGM (03.504)	0,45
3	Şantiye Dışına Kamyonla Kazı Malzemesi ve Moloz Nakli Birim Maliyeti	Tablo 4	8,77
Genel Toplam=			2,32

O3 bağlantı yolunda kullanılan plentmiks temel tabakası malzeme miktarı Tablo 4' de 164256 ton olarak gösterilmiştir. Toplam plentmiks temel tabakası hurda maliyeti $164256*2,32= 381074$ TL olarak hesaplanır.

Alttemel Tabakası Hurda Maliyeti: Ömrünü tamamlamış olan yolun kazılması, Habibler Fabrikası'na nakledilmesi ve alttemel tabakasının geri dönüşümde %40 tasarruf sağladığı kabul edilmiştir.

Bu maliyetler, pozlar ve analiz çalışmaları neticesinde Tablo 10' de gösterilmiştir.

Tablo 10. Alttemel Tabakası Hurda Maliyeti

Sıra no	Birim Maliyetler	Yardımcı Poz ve İşlem	Tutar (TL/ton)
1	Hurda Geri Kazanım (Plentaltı Alttemel Birim Maliyeti×0,40)=21,00*0,40= 8,40	Tablo 5	-8,40
2	210 HP'lik Ekskavatörün 1 ton Alttemel Malzemesini Kazı Yükleme ve Boşaltması	KGM (03.504)	0,47
3	Şantiye Dışına Kamyonla Kazı Malzemesi ve Moloz Nakli Birim Maliyeti	Tablo 5	8,77
Genel Toplam=			0,77

O3 bağlantı yolunda kullanılan alttemel tabakası malzeme miktarı Tablo 4' de 157296 ton olarak gösterilmiştir. Toplam alttemel tabakası hurda maliyeti $157296*0,77= 121118$ TL olarak hesaplanır. Tüm maliyetler Tablo 11'de özetlenmiştir. 2015 yılı \$/TL 2,68 kabul edilmiştir.

Tablo 11. Maliyet Hesapları

	Maliyet Kalemi	TL	\$
1	Yatırım Maliyeti	19839619	7402843
2	Yıllık Çatlak Bakım Maliyeti	24047	8973
3	Yıllık Yama Onarım Maliyeti	94784	35367
4	Aşınma Tabakası Yenilenmesi Maliyeti	3269808	1220078
5	Aşınma Tabakası Hurda Maliyeti	631724	235718
6	Binder Tabakası Hurda Maliyeti	772602	288284
7	Plentmiks Temel Hurda Maliyeti	381074	142192
8	Alttemel Hurda Maliyeti	121118	45193

Tablo 12'de O3 Bağlantı Yoluna ait 2015-2036 yılları arası 21 yıllık süreçte yapılacak tüm maliyetler gösterilmiştir.

Tablo 12. Yaşam Döngüsü Maliyetler Tablosu (\$)

Dönem	Yıl	Üstyapı Yatırım Maliyeti	Yıllık Çatlak Bakım Maliyeti	Yıllık Yama Onarım Maliyeti	Aşınma Tabakası Yenilenmesi Maliyeti	Hurda Maliyetleri				Toplam
						Aşınma	Binder	Plentmiks Temel	Alttemel	
0	2015	7402843								7402843
1	2016		8973	35367						44340
2	2017		8973	35367						44340
3	2018		8973	35367						44340
4	2019		8973	35367						44340
5	2020		8973	35367						44340
6	2021		8973	35367						44340
7	2022				1220078	235718				1455796
8	2023		8973	35367						44340
9	2024		8973	35367						44340
10	2025		8973	35367						44340
11	2026		8973	35367						44340
12	2027		8973	35367						44340
13	2028		8973	35367						44340
14	2029				1220078	235718				1455796
15	2030		8973	35367						44340
16	2031		8973	35367						44340
17	2032		8973	35367						44340
18	2033		8973	35367						44340
19	2034		8973	35367						44340
20	2035		8973	35367						44340
21	2036					235718	288284	142191	45193	711386

Tablo 12'deki tüm maliyetler ve yıllık %2'lik \$ faizi de düşünülerek bu projenin maliyetinin Net Bugünkü Değeri (NBD) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$NBD = 7402843 + 44340 * (P/A, \%2, 6) + 1455796 * (P/F, \%2, 7) + 44340 * (P/A, \%2, 6) * (P/F, \%2, 7) + 1455796 * (P/F, \%2, 14) + 44340 * (P/A, \%2, 6) * (P/F, \%2, 14) + 711386 * (P/F, \%2, 21)$$

(P/F, %i, n) = F miktarındaki paranın % i ve n yıl önceki P değerini hesaplayan faktör değeri

(P/A, %i, n) = A miktarındaki her yıl tekrar eden paranın % i ve n yıl için P değerini hesaplayan faktör değeri

$$NBD = 7402843 + 44340 * 5,601 + 1455796 * 0,8706 + 44340 * 5,601 * 0,8706 + 1455796 * 0,7579 + 44340 * 5,601 * 0,7579 + 711386 * 0,6598$$

$$NBD = \$10895763$$

4. Sonuç ve Öneriler

Ülkemizde en önemli yatırım maliyetlerinden olan ulaşım maliyetlerine ait asfalt yollar, gerek yapımı gerekse bakım, onarım ve hurda safhalarında meydana gelen maliyetleri ile toplumsal ve ekonomik alanlardaki etkisini her daim göstermektedir. Bu nedenledir ki, doğru yatırım kararı vermek için tüm maliyetlerin doğru hesaplanması çok önemlidir.

Bu çalışmada, YDMA yöntemiyle O3 Bağlantı Yoluna ait yol üstyapısının, yapımından kullanım süresi sonuna kadar olan bakım, onarım ve hurda maliyetlerini etkileyen faktörler ve bu faktörlerin maliyetleri hesaplanmıştır. Bu maliyetlerin ayrıca dönemsel olarak bir bütçe çerçevesinde maliyet dağılımı yapılmış ve dolar kuru üzerinden uygulanan faiz oranı ile yol üstyapısına ait net bugünkü değeri hesaplanmıştır. Bu çalışmada YDMA'ya göre;

- 8,70 km uzunluğundaki O3 Bağlantı yolunun üstyapı ömrünün maliyetlerinin net bugünkü değeri %2 yıllık faizli ortamda \$10895763'dır.
- 21 yıllık üst yapı ömrünün yaklaşık %64'ü yatırım maliyeti, %31'i onarım ve bakım maliyeti ve %5'i ise hurda maliyettir.

- 3 geliş ve 3 gidişli bir otobana ait yol üstyapısının km başına maliyetlerinin net bugünkü değeri %2 yıllık faizli ortamda 1,25 milyon dolardır.
- Her yedi yılda bir yol üst yapısının %20 si kadar maliyetle yol üst yenileme çalışması gerçekleştirilmektedir.
- Yol üstyapısı hurda maliyetinde, hurdaya gönderilecek malzemenin taşıma yolu mesafesinin kısaltılması ve geri dönüşüm miktarının artırılması neticesinde maliyetlerin azalması mümkündür.
- Geri dönüşüme gönderilecek malzemenin, geri dönüşümde kullanılacak malzeme miktarı oranının iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Ayrıca imalattan çıkacak olan geri dönüşüm malzemesinin, moloz döküm sahasına olan mesafesi kısa olup, maliyet açısından pozitif etkisi söz konusu olması durumunda, geri dönüşüme tabi tutulmasının yerine moloz döküm sahasına gönderilme işlemi gerçekleştirilebilir. Ancak petrol yan ürünü olan bitüm bazlı bu ürünlerin moloz döküm sahasındaki çevresel etki değerlendirilmesinin mutlak suretle analiz edilmesi gereklidir.
- Yaşam döngüsü maliyet analizi boyunca dönemsel öngörülen harcamalar için mali bir bütçe hazırlanmalı ve bu mali bütçeye ait harcamalar kısıntıya gidilmeden gerçekleştirilmelidir. Yol yapım ve onarım çalışmalarında bakım & onarımı geç yapılmış ya da yapılmamış bir yolun ileri yıllardaki bakım & onarım maliyetlerinin daha da çok artacağı ve yol ömrünün daha kısa olacağı unutulmamalıdır.
- Yol bakım & onarım çalışmalarında ülkemiz genelinde yapılan harcamaların bilimsel verilerde kullanılması için kayıt altına alınmış geçmiş yıllara ait veri bulunabilmesi yapılan araştırmalar neticesinde zor olduğu anlaşılmıştır. Bilimsel çalışmalara ışık tutabilmesi için ülkemiz genelinde yapılan yol bakım & onarımların verilerinin sağlıklı bir şekilde sistemsal olarak tutulması önemlidir.
- Ham petrolün yan ürünü olan bitüm malzemesi yol yapım çalışmalarının önemli bir yapı taşıdır.

Referanslar

Akbulut, H., İçağa, Y., & Gürer, C. (2003). Atık Agregaların Asfalt Yol Kaplamalarında Tekrar Kullanım İmkanları ve CEN Standartları. III Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 3-4.

Orhan, F., 2012, "Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları", KGM.

Öztürk, E. A. (2004). Karayolu esnek üstyapı tasarımı yeni bir yöntem: yüksek performanslı asfalt kaplama. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 19(2).

Şevik, S., & Eser, L. Y. (2016). Türkiye'de Karayollarında Fiyatlandırma ve Özelleştirme Uygulamaları: Bir Model Önerisi. Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi.

<http://www.teknomaccafferri.com.tr/upload/sayfa/Yol-Alt-ve-Ust-Yapi-Guclendirme-Uygulamalari.pdf>

https://www.academia.edu/6551437/karayollar%C4%B1nda_%C3%BCst_yap%C4%B1_projelendirme_rehberi



Stronsiyum Hekzaferrit Esaslı Ticari Seramik Mıknatısların Mikroyapısal Ve Manyetik Karakterizasyonu

Microstructural and Magnetic Characterization of The Commercial Strontium Hexaferrite Ceramic Magnets

Burcu Ertuğ¹

¹ Nişantaşı Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Maslak 1453 NeoTech Kampüsü 34398 İstanbul, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 19/03/2019

Kabul / Accepted: 08/09/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 27/09/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Bu çalışmada, $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ esaslı ticari ferrit mıknatıslarının, mikroyapısal ve manyetik karakterizasyonu yapılmıştır. Yoğunluk hesaplamaları, Y30BH ve DM33H örneklerde sırasıyla, 9,4 ve 4,9 g/cm^3 değerlerine karşılık gelen düşük porozite yüzdeleri vermiştir. Örneklerde taneler arası porozite yüzdesinin düşük olduğu, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) incelemeleri ile de doğrulanmıştır. Manyetik özellikler için histerizis eğrileri, Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) ile belirlenmiştir. Doyma ve kalıcı manyetizasyonlar, Y30BH örnek için sırasıyla, 56,45 emu/g ve 32 emu/g olup DM33H örneğin manyetizasyon değerlerinden daha yüksektir. Y30BH örneğin yüksek manyetizasyonu, stronsiyum hekzaferrit faz miktarının yüksek olması ile açıklanabilir. Y30BH örnekte yüksek manyetizasyona daha düşük koerzivite, H_c 3750 Oe değeri eşlik etmektedir. Y30BH ve DM33H mıknatıslarda maksimum enerji çarpanı (BH)max ise, sırasıyla 55,7 ve 34,2 kJ/m^3 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Hekzaferrit, sert mıknatıs, histerizis, manyetizasyon, koerzivite”

Abstract

In the present study, the microstructural and magnetic characterization of the commercial $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ magnets have been carried out. Density calculations for Y30BH and DM33H samples yielded 9.4 and 4.9 g/cm^3 , respectively corresponding to low porosity percentages. Scanning Electron Microscopy (SEM) examinations confirmed that there is a low amount of intergranular porosity. The magnetic hysteresis curves have been determined by using Vibrating Sample Magnetometer (VSM). The saturation and remanent magnetization of Y30BH sample have been 56.45 emu/g and 32 emu/g, respectively thus they have been higher than those of DM33H sample. Improved magnetization of Y30BH sample can be attributed to the high content of strontium hexaferrite phase with a lower coercivity, H_c 3750 Oe. Maximum energy products, (BH)max have been calculated to be 55.7 and 34.2 kJ/m^3 , respectively for Y30BH and DM33H magnets.

Key Words

“Hexaferrite, hard magnet, hysteresis, magnetization, coercivity”

1. Giriş

Arais vd. (2018)'ne göre katı hal elektroniği alanındaki hızlı gelişmeler, ferritlerin değişik frekans aralıklarındaki davranışlarının detaylı olarak incelenmesini zorunlu hale getirmiştir. Öte yandan hekzagonal yapıda ferritler, son derece geniş aralıkta değiştirilebilen manyetik özellikleri nedeniyle, çok sayıda elektronik ve mikrodalga cihazda kullanılmaktadırlar.

Koutzarova vd. (2010) ve Tanwar vd. (2018)'nin çalışmalarına göre, altı farklı sınıftan oluşan hekzaferritlerin çoğunun, ana birim olarak M-yapısını içermektedir. Bu yapı, en basit yapı olup R ve S bloklarından oluşmaktadır. R blok, $BaFe_6O_{11}$ stokiometrisine sahiptir ve yapısında 5 adet oktahedral ve 1 adet trigonal bipiramidal konumu içermektedir. S blok ise spinel yapısında olup 2 tetrahedral ve 4 oktahedral konumlarına sahiptir. Hekzaferrit kafesindeki 5 farklı arayer konumları, Fe^{+3} iyonları tarafından doldurulmuştur. Bunlardan S blokta bulunan iyonlar, oktahedral 2a ve tetrahedral 4f1 konumlarına; R blokta bulunanlar, bipiramidal 2b ve oktahedral 4f2 konumlarına; R-S arayüzeyinde bulunanlar ise, oktahedral 12k konumlarına yerleşmişlerdir.

Wu vd. (2016); Sardjono vd. (2016) ve Narang ve Huidara (2006)'nin çalışmalarında, Fe^{+3} iyonu başına net manyetik moment, 5 μB olarak hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak, baryum hekzaferrit bileşiğinin formül başına net manyetik momenti ise, 20 μB olmaktadır. Baryum ve stronsiyum hekzaferrit, $MO_6Fe_2O_3$ (M=Ba,Sr,Pb) genel formülüne sahip seramik esaslı mıknatıslar olup manyetik özellikleri çok yüksek değildir. Koerziviteleri ise, AlNiCo mıknatıslarından daha yüksektir. Curie sıcaklıkları, 450-460°C civarındadır. M-tipi hekzaferrit sistemleri, tek eksenli kolineer ferrimanyetik mıknatıslardır, kolay manyetizasyon doğrultuları, hekzagonal c-eksenine paraleldir. Fe konumlarının manyetik momentleri, R ve S bloklarının içerisinde, kolineer ferrimanyetik yapılar içerisinde, ab düzleminde bulunur. Fe^{+2} iyonlarından komşu Fe^{+3} iyonlarına elektron transferine bağlı ferromanyetik Fe^{3+} - Fe^{+2} etkileşimi ve oktahedral konumlarındaki Fe^{+2} anizotropisi, demir iyonlarının, tüm hekzaferrit yapılarında gözlenen hakim mekanizmadır (MS-Schramberg GmbH & Co. KG 2017).

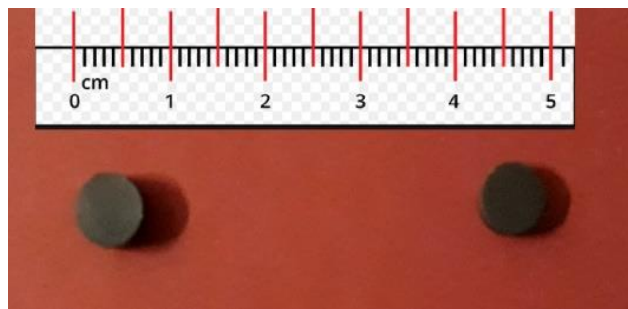
Yamamoto vd. (1997), katı hal sentezi; Pullar vd. (2001), birlikte çöktürme; Jean vd. (2010), sol-jel; Zhong vd. (1997a), hidrotermal yöntem; Alamolhoda vd. (2006), cam kristalizasyonu; Sivakumar vd. (2012), yanma reaksiyonu yöntemleri kullanılarak hekzaferritlerin manyetik özelliklerini geliştirilmeye çalışılmıştır. Ultra ince partikül eldesi amacıyla, kimyasal birlikte çöktürme, hidrotermal ve sol-jel yöntemleri, oto-yanma sentezi yöntemi kullanılmaktadır. Samikannu vd. (2011) ve Chaudhury vd. (2008) çalışmalarında, bu yöntemler arasında sol-jel oto-yanma yöntemi, maliyetinin düşük olması ve yöntemin basitliği nedeniyle, homojen ultra ince toz üretiminde öne çıkmıştır.

Zhong vd. (1997b), stronsiyum ferritler üzerinde, yüksek tek eksenli manyetik anizotropi, yüksek doyma manyetizasyonu ve yüksek koerzivite özelliklerini incelemiştir. Stronsiyum ferritler, diğer yöntemlerin yanı sıra, Brito vd. (2006) tarafından mikro-emülsiyon ve Wang vd. (2010) tarafından sitrat ile başlanan prosesler kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca, Mangai vd. (2014) ve Mallick vd. (2007), yüksek saflıkta, ultra ince boyutta, iyi dispersiyon ve mükemmel manyetik özelliklere sahip $SrFe_{12}O_{19}$ üretimini gerçekleştirmişlerdir. Öte yandan, baryum ve stronsiyum ferritler, yüksek elektriksel özdirençleri ve düşük eddy akımı kayıpları nedeniyle diğer manyetik malzemelerden üstündürler (Sadullahoğlu vd. 2011).

Bu çalışmada, iki firmadan temin edilen stronsiyum hekzaferrit esaslı sert mıknatısların ferromanyetik histerizis eğrileri çıkarılarak manyetik parametreleri belirlenmiştir. Sert ferrit mıknatıslar, yüksek manyetik geçirgenlik ve yüksek koerziviteye sahiptirler. Aynı zamanda, 300°C'e kadar yüksek sıcaklık kararlılığı gösterirler ve sıcaklık yükseldikçe koerziviteleri artar. Bu özellikleri nedeniyle sert ferrit mıknatıslar, hoparlör bobini, doğru akım motoru vb. uygulamalarında sıklıkla kullanılırlar (Imagnetshop 2019). Güncel bir analizde, ferrit pazarının büyüme trendleri, büyük üreticiler, ferrit mıknatıs kullanan sektörler ve 2019-2023 dönemi için gelecek projeksiyonu ele alınmıştır. Bu analize göre küresel ferrit mıknatıs pazarının lideri % 52.30 üretim payına sahip Çin olup Japonya, ikinci en büyük üreticidir ve küresel üretimin %13.82'ini oluşturmaktadır (Marketwatch 2019). Bu çalışmanın amacı, ülkemizde yerli sert ferrit mıknatısların üretimini yaygınlaştırılması ve daha ekonomik hale getirilmesi için ticari ferrit mıknatısların karakterizasyonunun yapılarak özelliklerinin belirlenmesidir.

2. Materyal ve Metot

Ticari seramik mıknatıslar, Şekil 1'de gösterilen DM33H (Mıknatıs Ltd., İzmir) ve Y30BH (Manyet Ltd., İstanbul) kodlarına sahip pelet şeklinde örneklerdir. Pelet örneklerin yoğunlukları, boyutlar hassas olarak ölçülerek ve pelet ağırlıklarının ise hassas terazi yardımıyla tartımları alınarak ile hesaplanmıştır ve sinterlenmiş halde yoğunluklar, teorik yoğunluklar ile kıyaslanmıştır.



Şekil 1. Y30BH ve DM33H mıknatıs peletlerinin boyutları.

Seramik örneklerin mikroyapısal özellikleri, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) (JEOL-JSM 6060-2003) yardımıyla incelenmiştir. SEM incelemeleri için, önce örnekler demanyetizasyon ısıl işlemi uygulanmıştır. Demanyetizasyon ısıl işlemi, 5°C/dakika ısıtma hızı ve 10°C/dakika soğutma hızı ile 460°C'de 2 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. SEM-EDS analizleri için her iki örneğin yüzeyleri, takım zımpara ile hazırlanmış ve daha sonra keçe yardımıyla parlatılmıştır. Yüzeyler etil alkol ile temizlendikten sonra kurutulmuştur.

Y30BH ve DM33H mıknatıs örneklerin manyetik özellikleri, oda sıcaklığında 15kOe manyetik alan altında Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) (Quantum design, Model-PPMS9T, USA) kullanılarak belirlenmiştir. Manyetik histerizis eğrileri kullanılarak her iki örnek için doyma (M_s , emu/g) ve kalıcı manyetizasyon (M_r , emu/g) ve koerzivite (H_c , kOe) değerleri belirlenmiştir.

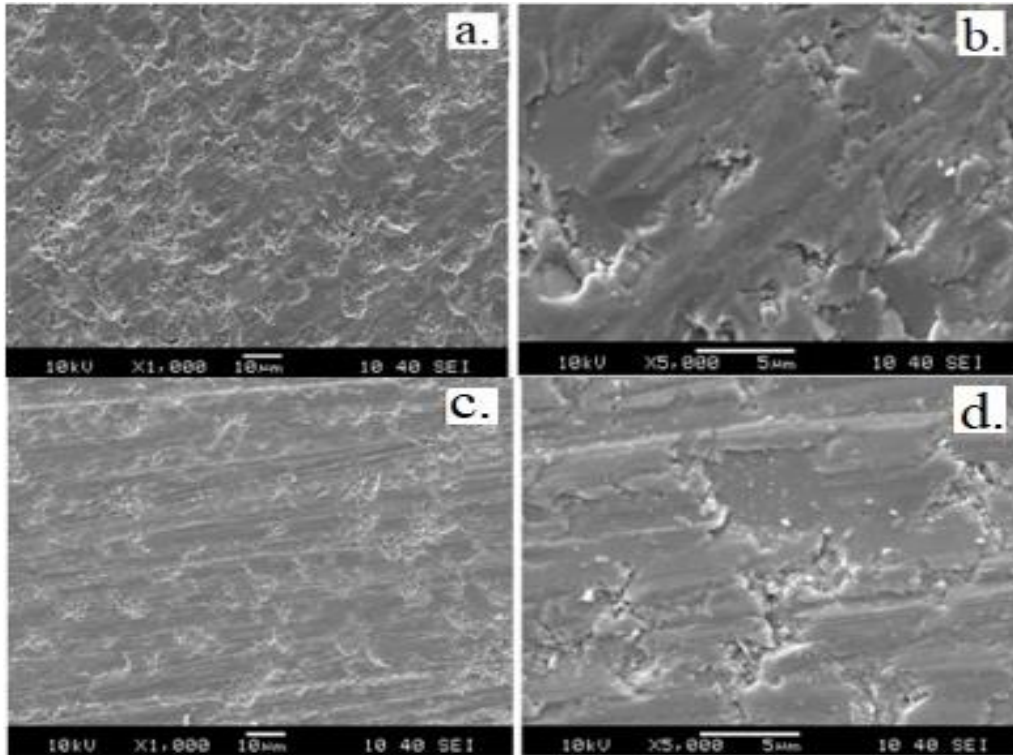
3. Bulgular ve Tartışma

SEM görüntüleri (Şekil 2), hekzaferritlere özgü hekzagonal tane morfolojisini belirgin olarak göstermemiştir. Bunun nedeni sinterleme sırasında mikroyapıda tanelerin aglomerasyona uğrayarak büyümesi ve kompakt bir yapı oluşturmasıdır. Taneler arası porozite ihmal edilebilir düzeydedir ve bu düşük porozite hali, ferrit malzemelerde üstün manyetik özellikleri elde etmek için gereken bir mikroyapısal özelliktir. SEM görüntülerinde gözlenen düşük porozite, sinterlenmiş halde yoğunluk yardımıyla hesaplanan Tablo 1'de verilen porozite yüzdesi değerleriyle uyumludur. Seramik esaslı ticari kalıcı hekzaferrit mıknatıslarda yoğunluklar 4,9-5,0 g/cm³ civarındadır (E-magnets 2019).

Sebayang vd. (2016) ve Dushaq vd. (2013)'ne göre yüksek yoğunluk, doyma manyetizasyonun ve kalıcı manyetizasyonun yüksek olması için gereklidir. Bu çalışma sonucu, maksimum 4,66 g/cm³ yoğunluğa ulaşılmıştır.

Tablo 1. Ferrit esaslı mıknatısların yoğunluklarının karşılaştırılması.

No	Yoğunluk (g/cm ³)	Porozite (%)	Referans
1	4,71	3,90	Sardjono vd. (2016)
2	4,22	13,9	Mallick vd. (2007)
3	4,00	18,4	Sadullahoğlu vd. (2011)
4	4,55	7,14	Sebayang vd. (2016)
5	4,44	9,40	Y30BH
6	4,66	4,90	DM33H



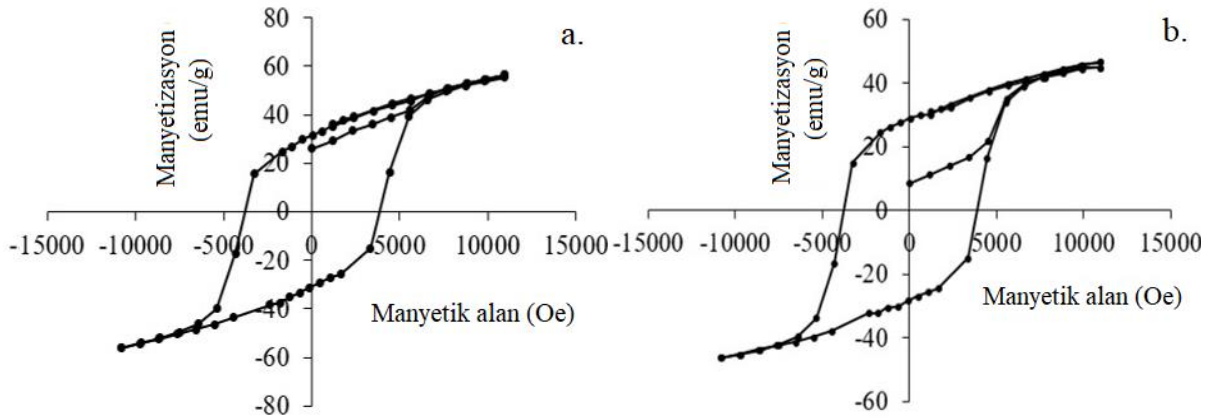
Şekil 2. Y30BH için (a) x1kx, (b) x5kx ve DM33H için (c) x1kx, (d) x5kx büyütme SEM görüntüleri.

Ticari Y30BH ve DM33H mıknatıs örneklerinin, manyetik parametreleri, Şekil 3’de verilen manyetik histerizis eğrilerinden belirlenmiştir. Tablo 2’de Y30BH ve DM33H örnekleri, ticari mıknatıs TM-1 ve TM-2 olarak gösterilmiştir.

Tablo 2. Hekzaferrit mıknatısların manyetik özelliklerinin karşılaştırılması.

No	Bileşim	Doyma manyetizasyon (emu/g)	Kalıcı manyetizasyon (emu/g)	Koerzivite (kOe)	Referans
1	BaF	61,0	30	4,50	Mallick vd. (2007)
2	BaF	68,7	28	1,23	Sadulloğlu vd. (2011)
4	BaF	60,0	40	1,57	Sebayang vd. (2016)
5	SrF	60,0	35,8	6,10	Dushaq vd. (2013)
6	SrF	67,2	39,1	6,0	Tan ve Chen (2013)
7	SrF	60,0	35,14	7,0	Luo vd. (2015)
8	TM-1	56,45	32	3,80	Y30BH
9	TM-2	46,68	28	4,00	DM33H

Her iki mıknatısa ait manyetik histerizis eğrileri, oda sıcaklığında tipik sert ferrimanyetik davranışı göstermiştir. Y30BH örnek, ticari uygulama açısından en popüler sert ferritlerden birisidir. Doyma manyetizasyon, M_s verileri, Y30BH ve DM33H örnekleri için, 56,45 emu/g ve 46,68 emu/g olarak belirlenmiştir. Tablo 2’de verilen manyetik parametreler incelendiğinde, Y30BH ve DM33H örneklerinin doyma manyetizasyon değerlerinin, $SrFe_{12}O_{19}$ (SrF) ve $BaFe_{12}O_{19}$ (BaF) değerlerine göre daha düşük, koerzivitelerinin ise, kimi örneklerin değerlerine yakın olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 3. (a) Y30BH ve (b) DM33H örneklerin histerizis eğrileri.

Dış manyetik alan altında, ticari mıknatısların manyetik domenlerinin düzenlenmesi sonucu elde edilen maksimum manyetizasyon, doyma manyetizasyon olarak ölçülmüştür. Doyma manyetizasyonları, M_s Y30BH ve DM33H mıknatıslar için, 10,97 kOe ve 10,98 kOe alan altında belirlenmiştir. Kalıcı manyetizasyon, M_r değerleri (sıfır manyetik alana karşılık gelir), Y30BH ve DM33H örnekler için sırasıyla 32 emu/g ve 28 emu/g olarak ölçülmüştür. Kalıcı manyetizasyon, M_r doyma manyetizasyon değeri ile ilişkilidir. Bu nedenle hekzaferrit esaslı ticari kalıcı mıknatısların doyma manyetizasyonları beklendiği üzere yüksek olmuştur. Hekzaferrit mıknatıslar için kalıcı mıknatıslanmanın yüksek olması, M_r/M_s oranının 1’e yakın değer alması anlamına gelmektedir. M_r/M_s oranı, Y30BH ve DM33H örnekler için sırasıyla, 0,57 ve 0,6 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen koerzivite değerleri ise, H_c Y30BH ve DM33H örnekler için sırasıyla, 3750 Oe ve 4000 Oe olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Y30BH örneklerin BH_{max} çarpanlarının hesaplanması.

						(BH) _{max} , MGxOe (kJ/m ³)
Manyetik alan, kOe	1,229	2,361	2,854	2,994	3,098	7,0 (55,7)
Manyetizasyon, G (emu/g)	(934,33)	(1795)	(2165,4)	(2274)	(2349,91)	
	15,49	29,76	35,9	37,7	39	

Tablo 4. DM33H örneklerin BHmax çarpanlarının hesaplanması.

						(BH) _{max} , MGxOe (kJ/m ³)
Manyetik alan, kOe	1,185	2,081	2,19	2,299	2,386	
Manyetizasyon, G (emu/g)	(901,76)	(1582,75)	(1664,8)	(1749,2)	(1815,6)	4,3 (34,2)
	14,95	29,76	27,6	29	30,1	

Çalışmada kullanılan hekzaferrit esaslı ticari kalıcı mıknatıslarda en önemli parametre, maksimum enerji çarpanı (BH)_{max} olduğundan, Şekil 3'teki manyetik histerezis eğrilerinin ikinci çeyrek bölgeleri kullanılarak Y30BH ve DM33H kalıcı mıknatısların yapabilecekleri maksimum işler hesaplanmıştır ve iş miktarları, Tablo 3 ve Tablo 4'te karşılaştırılmıştır. Manyetik histerezis eğrisinin ikinci çeyrek bölgesi içinde çizilebilecek en büyük alana sahip dikdörtgeninin bulunması yardımıyla, Tablo 3 ve Tablo 4'te Y30BH ve DM33H örneklerin, BH_{max} çarpanları sırasıyla, 55,7 ve 34,2 kJ/m³ olarak hesaplanmıştır. Y30BH örneğin maksimum enerji çarpanı değerinin, DM33H örneğe göre yüksek olması, örneklerdeki kalıcı manyetizasyonu sağlayan stokiometrik stronsiyum hekzaferrit, SrFe₁₂O₁₉ fazı miktarının, Y30BH örnekte daha yüksek olması şeklinde yorumlanabilir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, iki farklı SrFe₁₂O₁₉ esaslı ticari sert ferrit mıknatısının, mikroyapısal ve manyetik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışma sonucu, maksimum 4,66 g/cm³ yoğunluğa ulaşılmıştır. Mikroyapı incelemeleri, her iki örnekte taneler arası porozite varlığının son derece düşük olduğunu ve mikroyapısal özelliklerin üstün manyetik özellik eldesi için uygun olduğunu göstermiştir.

Y30BH ve DM33H ticari mıknatıs örneklerde, doyma manyetizasyonlar, 56,45 emu/g ve 46,68 emu/g olarak ölçülmüştür. Kalıcı manyetizasyon, Mr değerleri yardımıyla hesaplanan Mr/Ms oranları Y30BH ve DM33H için, sırasıyla 0,57 ve 0,6 olarak hesaplanmıştır. Y30BH örnekte manyetizasyonun yüksek olması, manyetik stronsiyum hekzaferrit faz miktarının fazla olması şeklinde yorumlanabilir. Diğer yandan, Y30BH örnekte manyetizasyon değerleri yüksek olmakla birlikte, olası bir tane büyümesi dolayısıyla koerzivit değerleri düşmüştür. Söz konusu koerzivit değerleri, Hc Y30BH ve DM33H örnekler için sırasıyla, 3750 Oe ve 4000 Oe olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan ticari hekzaferrit mıknatıslarda maksimum enerji çarpanı (BH)_{max} Y30BH ve DM33H örnekler için sırasıyla, 55,7 ve 34,2 kJ/m³ olarak hesaplanmıştır.

Teşekkürler

Ticari DM33H örnek, Mıknatıs Araştırma ve Geliştirme Madencilik ve Tıbbi Aletler San. ve Tic. Ltd. Şti., İzmir ve Y30BH örnek, Manyet Ltd., İstanbul firmalarından temin edilmiştir. Örneklerin mikroyapı incelemeleri, Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ), Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Endüstriyel Hizmetler Birimi sorumlusu Metalurji Müh. Haluk Gürses tarafından gerçekleştirilmiştir. Manyetizasyon ölçümleri, İstanbul Teknik Üniversitesi (İ.T.Ü), Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Baki Altunçevahir tarafından gerçekleştirilmiştir.

Referanslar

- Alamolhoda, S., Seyyed Ebrahimi, S. A., & Badiei, A. (2006). Optimization of milling time before and after recalcination on HTR processed strontium hexaferrite powder. *The Physics of Metals and Metallography*, 102(1), 46-48. doi: 10.1134/S0031918X06140110
- Arais, A. A., Rady, K. E., & Shams, M. S. (2018). AC conductivity and dielectric properties of Mn-Zn ferrites. *Bulgarian Journal of Physics*, 45(1), 44-53.
- Brito, P. C. A., Gomes, R. F., Duque, J. G. S., & Macedo, M. A. (2006). SrFe₁₂O₁₉ prepared by the proteic sol-gel process. *Physica B: Condensed Matter*, 384(1), 91-93. doi: 10.1016/j.physb.2006.05.159
- Chaudhury, S., Rakshit, S. K., Parida, S. C., Singh, Z., Singh, M. K. D. & Venugopal, V. (2008). Studies on structural and thermo-chemical behavior of MFe₁₂O₁₉(s) (M = Sr, Ba and Pb) prepared by citrate-nitrate gel combustion method. *Journal of Alloys and Compounds*, 455(1-2), 25-30.
- Dushaq, G. H., Mahmood, S. H., Bsoul, I., Juwhari, H. K., Lahlouh, B., AlDamen, M. A. (2013). Effects of molybdenum concentration and valence state on the structural and magnetic properties of BaFe_{11.6}Mo_xZn_{0.4-x}O₁₉ hexaferrites. *Acta Metallurgica Sinica*, 26 (5), 509-516. doi:10.1007/s40195-013-0075-2
- Jean, M., Nachbaur, V., Bran, J. & Le Breton, J. M. (2010). Synthesis and characterization of SrFe₁₂O₁₉ powder obtained by hydrothermal process. *Journal of Alloys and compounds*, 496 (1-2), 306-312. doi:10.1016/j.jallcom.2010.02.002

Koutzarova, T., Kolev, S., Grigorov, K., Ghelev, C., Zaleski, A., Vandenberghe, R. E., Ausloos, M., Henrist, C., Cloots, R. & Nedkov, I. (2010). Structural and magnetic properties of nanosized barium hexaferrite powders obtained by microemulsion technique. *Solid State Phenomena*, 159, 57-62. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.159.57

Luo, J., Xu, Y. & Mao, H. (2015). Magnetic and microwave absorption properties of rare earth ions (Sm^{3+} , Er^{3+}) doped strontium ferrite and its nanocomposites with polypyrrole. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 381(1), 65-37. doi:10.1016/j.jmmm.2015.01.019

Mallick, K. K., Shepherd, P. & Green, R.J. (2007). Magnetic properties of cobalt substituted M-type barium hexaferrite prepared by co-precipitation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 312, 418-429. doi:10.1016/j.jmmm.2006.11.130

Mangai, K. A., Sureshkumar, P., Priya, M. & Rathnakumari, M. (2014). Structural and magnetic properties of strontium hexaferrites for permanent magnets. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(3), 65-69.

Narang, S. B., Huidara, L. S. (2006). Microwave dielectric properties of M-type barium, calcium and strontium hexaferrite substituted with Co and Ti. *Journal of Ceramic Processing Research*, 7(2), 113-116.

Pullar, R. C., Taylor, M. D. & Bhattacharya, A. K. (2001). Halide removal from BaM ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) and SrM ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) ferrite fibers via a steaming process. *Journal of Materials Research*, 16(11), 3162-3169. doi:10.1557/JMR.2001.0436

Sadullahoğlu, G., Ertuğ, B., Gökçe, H., Altuncevahir, B., Öveçoğlu, M. L. & Addemir, A. O. 5-9 Ekim (2011). The effect of rare-earth cations on the structural properties of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ hard magnets. 6. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı ve Sergisi, Ankara ODTÜ.

Samikannu, J., Sinnappan, Mannarswamy, S., Cinnasamy, T. & Thirunavukarasu, K. (2011). Synthesis and magnetic properties of conventional and microwave calcined strontium hexaferrite powder. *Materials Sciences and Applications*, 2(6), 638-642. doi:10.4236/msa.2011.26087.

Sardjono, P., Muljadi, S. & Djauhari, N. R. (2016). Microstructure, physical properties, and magnetic flux density analysis of permanent magnet $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ using milling and sintering preparation methods. *Journal of Physics Conference Series*, 739(1), 012-089. doi: 10.1088/1742-6596/739/1/012089

Sebayang, P., Sari, A. Y., Ginting, D., Allan, Y., Nasruddin, M. N. & Sebayang, K. (2016). Characteristics of B_2O_3 and Fe added into $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ permanent magnets prepared at different milling time and sintering temperature. *AIP Conference Proceedings*, 1711, 020004. doi:10.1063/1.4941613

Sivakumar, P., Ramesh, R., Ramanand, A., Ponnusamy, S. & Muthamizhchelvan, C. (2012). Synthesis and study of magnetic properties of NiFe_2O_4 nanoparticles by PVA assisted auto-combustion method. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 23(5), 1011-1015. doi:10.1007/s10854-011-0539-y

Tan, G., Chen, X. (2013). Synthesis, structures, and multiferroic properties of strontium hexaferrite ceramics. *Journal of Electronic Materials*, 42(5), 906-911. doi:10.1007/s11664-012-2426-6

Tanwar, K., Sri Gyan, D., Gupta, P., Pandey, S., Parkash, O. & Kumar, D. (2018). Investigation of crystal structure, microstructure and low temperature magnetic behavior of Ce^{4+} and Zn^{2+} co-doped barium hexaferrites ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$). *RSC Adv.*, 8, 19600-19609. doi: 10.1039/C8RA02455C

Wang, Z. Y., Zhong, L. M., Lv, J. L., Qian, H. C., Zheng, Y. L., Fang, Y. Z., Jin, M. L. & Xu, J. Y. (2010). Microwave-assisted synthesis of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ hexaferrites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322(18), 2782-2785. doi:10.1016/j.jmmm.2010.04.027

Wu, C., Yu, Z., Sun, K., Nie, J., Guo, R., Liu, H., Jiang, X. & Lan, Z. (2016). Calculation of exchange integrals and Curie temperature for La-substituted barium hexaferrites. *Scientific Reports*, 6(36200) doi: 10.1038/srep36200

Yamamoto, H., Kumehara, H., Takeuchi, R. & Nishio, N. (1997). Magnetic properties of Sr-M ferrite fine particles. *Journal de Physique IV Colloque*, 07 (C1), C1-535-C1-536. doi:10.1051/jp4:19971219

Zhong, W., Ding, W., Zhang, N., Hong, J., Yan, Q. & Du, Y. (1997). Key step in synthesis of ultrafine $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ by sol-gel technique. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 168(1-2), 196-202. doi:10.1016/S0304-8853(96)00664-6

Zhong, W., Ding, W., Jiang, Y., Zhang, N., Zhang, J., Du, Y. & Yan, Q. (1997). Preparation and magnetic properties of barium hexaferrite nanoparticles produced by the citrate process. *Journal of American Ceramic Society*, 80(12), 3258-3262. doi:10.1111/j.1151-2916.1997.tb03264.x

MS-Schramberg GmbH & Co. KG web site 2017: <https://www.magnete.de/en/products/sintered-magnets.html>

Manyet Ltd., İstanbul web site 2019: <http://www.manyet.com/>

Miknatis Araştırma ve Geliştirme Madencilik ve Tıbbi Aletler San. ve Tic. Ltd. Şti., İzmir web site 2019: <http://www.miknatis.net/miknatis/>

E-magnets web site 2019: https://e-magnetsuk.com/ferrite_magnets/characteristics.aspx

Imagnetshop web site 2019: <https://www.imagnetshop.com/en/magnet-applications/current-applications-of-ferrite-magnets-b10.html>

2019-2023 Global Ferrite Magnets Consumption Market Report: Marketwatch web site 2019: <https://www.marketwatch.com/>



Dıştan Dişli Pompalarda Diş Ucundaki Kaçakların Teorik ve Sayısal Karşılaştırılması

Comparison of Theoretical and Numerical Tip Leakages in External Gear Pump

Deniz İmamoğlu¹ , Özgür Ertunç¹ 

¹Özyeğin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34794 Çekmeköy İstanbul, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 20/05/2019

Kabul / Accepted: 01/08/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 27/09/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Dıştan dişli pompalar, akışkan gücünün kullanıldığı uygulamalarda en çok tercih edilen pompa tiplerinden biri olmasına rağmen tasarım aşamasında iç kaçaklar, gürültü ve titreşim gibi problemler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, teorik hesaplamaları ve akış simülasyonlarını karşılaştırırken, bu çalışmada yeni bir iki boyutlu sayısal uç kaçağı analiz yöntemi geliştirilmiştir. Akış simülasyonları, 7 farklı dönme hızında ve 2 bardan 10 bara kadar olan basınç farklarında yapılmıştır. Ayrıca uç kaçak üzerindeki sıcaklık etkileri bu yeni yöntemle araştırılmıştır. Bu amaçla, gövde duvarı sıcaklığı 30 °C ila 60 °C arasında değiştirilmiştir. Sayısal ve teorik hesaplamalar arasındaki farkın seçilen parametre aralığında % 100'den fazla olabileceği gösterilmiştir. Bu sapma, dişli pompasının giriş ve çıkış portları arasındaki basınç farkının artmasıyla artmaktadır. Simülasyonlar, sapmanın, diş tepesi ile gövde duvarı arasında kaçak akış girerken ortaya çıkan enerji yitiminden ve teorik hesaplamalarda yapılan tam gelişmiş akış varsayımından kaynaklandığını ortaya koymuştur. Ayrıca, duvardaki sıcaklığın artması ile birlikte diş ucu kaçağının, viskozitenin sıcaklıkla düşmesine bağlı olarak, her 10 °C'de %10'luk bir arttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Dişli pompa”, “diş ucu kaçakları”, “sıcaklık etkisi”, “Hesaplamalı akışkan dinamiği”

Abstract

Although external gear pumps are one of the mostly used pump types in the fluid power applications, some problems related to them such as internal leakages, noise and vibration with gear pumps has to be considered during the design stage. Therefore, a novel two-dimensional numerical tip leakage analysis method has been developed in this study, while comparing the theoretical calculations and numerical simulations. Numerical simulations have been performed for pressure differences from 2 bars up to 10 bars and for seven different rotational speeds. Moreover, temperature effects on tip leakage has been investigated with this new method. For this purpose, the body wall temperature has been varied from 30 °C up to 60 °C. It is shown that the difference between numerical and theoretical calculations can be larger than 100% over the selected range of parameters. This deviation increases with the rise in the pressure difference between inlet and outlet ports of the gear pump. Simulations have revealed that the deviation is first, because of the energy dissipation occurring as the leakage flow enters and leaves the narrow gap between wall and tooth tip, which is ignored in the theoretical analysis, and second because of the fully developed flow assumption made in theoretical analysis. Furthermore, it has been shown that leakages increase 10% for each 10 °C temperature increment at the casing wall due to the drop in the viscosity of the fluid.

Key Words

“Gear pump”, “tip leakage”, “temperature effect”, “Computational fluid dynamics”

1. Giriş

Dişli pompalar, imalat kolaylığı, uzun süre sorunsuz ve güvenilir çalışma ve nispeten düşük üretim maliyeti nedeniyle birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bununla birlikte, dişli pompalar kaçak, gürültü ve titreşim gibi problemlere yatkındır (Ghionea vd., 2012). İç kaçaklar doğrudan dişli pompanın debi verimini etkilemektedir. Bundan dolayı, bir dıştan dişli pompa kaçaklar en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır. Kaçakları azaltabilmek için, diş ile gövde arasındaki boşluğun en aza indirilmesi gerekmektedir. Ek olarak, dönme hızı artırılarak da kaçakların azaltılması mümkündür. Boşlukları düşük seviyede tutmaya çalışmak üretim zorluğunu beraberinde getirmekte ve aynı zamanda yağlanmanın azalmasıyla yüzeylerin birbirine değmesine ve yıpranmasına yol açabilmektedir. Dişli pompa imal edilirken özellikle dişli yüzeyi ile gövde arasındaki uzaklığın tasarlandığı gibi imal edilmesi için iyi bir taşlama operasyonu yapılmalıdır. Aksi takdirde, hesaplanandan daha çok kaçaklarla karşılaşılabilir ve pompanın verimi düşebilir.

Teorik olarak; yüz kaçakları, diş ucu kaçakları ve iki dişin birleşim noktasındaki kaçaklar olmak üzere üç tip kaçak bulunmaktadır. Diş ile gövde arasındaki boşluğun 5-15 µm aralığında olması halinde, diş ucu kaçığının düşük seviyede olduğu gösterilmiştir (Koç vd., 1985). Başka bir çalışmada, basınç farkı temel alınarak kaçak hesabı yapabilmek için “ kaçan akış” denen bir katsayı kullanılmıştır. Kaçan akış katsayısının 250 RPM’ den 3500 RPM’ ye kadar değişen devir sayıları üzerindeki kaçak miktarına etkisi araştırılmış ve kayma akış katsayısının sabit dönme hızı için debi verimi düşük görülmüştür (Yusof vd., 2013). Schiffer, Benigni ve Jaberg (2013) tarafından, bir mini yüksek basınçlı dişli pompa için diş ucundaki kaçakları azaltmak amacıyla tasarlanan yüzer sızdırmazlık elemanının pompanın debi verimine etkisi incelenmiştir. Yüzer sızdırmazlık elemanı, dişli ile gövde arasında konumlandırılmıştır. Bunun sayesinde, aradaki boşluğu azaltmıştır ve diş ucu kaçaklarını en aza düşürmek amaçlanmıştır. Aynı zamanda, dişli yüzeyi ile gövde arasındaki alanı kapladığından yüzey kaçaklarında da azaltma öngörülmüştür. Araştırmalarında, üç farklı yüzer sızdırmazlık elemanı test edilmiş ve deneysel sonuçlara göre en yüksek hacimsel verim ve en düşük sızıntıya sahip olan seçilmiştir. Harici dişli pompaları, yakıt enjeksiyon sistemleri ve Seçici Katalitik İndirgeme (Selective Catalytic Reduction-SCR) sistemleri gibi su-üre karışımının düşük basınçta pompalandığı uygulamalar için de kullanılabilir. Devendran ve Vacca (2013) tarafından, Seçici Katalitik İndirgeme sistemleri için tasarlanan dişli pompanın optimizasyonu yapılmıştır. Akış sayıları, basınç açısı ve addendum-dedendum katsayısı değiştirilerek incelenen çalışmada; akış salınımları, basınç aşımaları, kaviteasyon ve debi verimi optimizasyon parametreleri olarak seçilmiştir.

Dıştan dişli pompa sürülen ve tahrik edilen dişliler gibi hareketli sınırlara sahiptir. Hareketli sınırlardan dolayı, simülasyonların da zamana bağlı çözülmesi gerekir. Dişli pompaların içindeki akışkanın akış yapısını araştırmak için birçok hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD - CFD : Computational Fluid Dynamics) çalışması yapılmıştır (Tablo 1). Ghazanfarian ve Ghanbari (2014), döner çiftli harici dişli pompa için dinamik olarak değişken yapıda olmayan ağ üzerinde konvektif terimler için ikinci dereceden ayrıklaştırma şeması ile k-ε türbülans modelini kullanmışlardır. Sonuçlarına göre, sabit basınç ve devir sayısında açıklığın 9 µm azaltılması net akış oranını % 30 arttırmaktadır. Ayrıca, emiş tarafındaki temas dişlerindeki bölgenin kaviteasyona daha yatkın olduğu gösterilmiştir. Houzeaux and Codina (2007), iki ve üç boyutlu olarak, emme odasını ve girişteki dişleri içeren tüm dişli pompanın ve yarım dişli pompanın simülasyonlarını yapmışlardır. İki boyutlu olarak yapılan yarım pompanın ve tüm pompanın sonuçları karşılaştırıldığında, basınç konturları ve hız profilleri arasında fazla bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Ek olarak, yarım pompayla yapılan üç boyutlu (3B) simülasyonlar iki boyutlu (2B) simülasyonlardan daha detaylı sonuç vermesine karşılık, 2B simülasyonlarda ortaya çıkan zamana bağlı basınç ve hız salınımları 3B’de çıkanlarla eş seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Diğer bir çalışmada, bir harici dişli pompanın emme odasındaki akışı araştırılmıştır. Standart k-ε, gerçekleştirilebilir k-ε, RNG k-ε ve Reynolds Stress Modelleri (RSM) gibi farklı türbülans modelleriyle laminer akış varsayımını (türbülans modeli kullanılmadan yapılan doğrudan hesaplar) karşılaştırılmıştır. Girdap yapısı ve hız vektörleri deneysel verilerle karşılaştırıldığında, RSM türbülans modeli deneysel verilere göre en çok örtüşen yöntem olarak belirlenmiştir (Castilla vd.,2010). Başka bir çalışmada ise, iki ve üç boyutlu simülasyonlar kullanılarak dişli pompanın yarısı farklı temas oranları ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, 3B simülasyonlarda hesaplanan akış hızının, 2B simülasyonlardan daha yüksek olduğu gösterilmiştir. İki boyutlu simülasyonlarda, hem girişte hem de çıkıştaki hızlarda daha düşük dalgalanmalar görülmüştür (Castilla vd., 2015). Strasser (2007), dişli pompanın deforme olabilen sayısal ağ kullanılarak CFD analizini yapmıştır. Simülasyon; zamana bağlı, laminer ve çok fazlı akış olarak modellenmiştir. Özellikle dişlilerde sayısal ağ deformasyonunun önemi vurgulanmıştır. Deformasyon bölgesindeki sayısal ağ büyüklüğü, sınır hücreleri ile benzer boyutta tutulmuştur ve sonuçların doğruluğunu arttırmak için sayısal ağın duvardan büyüme faktörü en aza indirilmiştir. Ayrıca zaman aralığı, her zaman aralığı başına 0.0003 devir olacak şekilde ayarlanmıştır.

Tablo 1. Literatürde dıştan dişli pompanın HAD simülasyonlarıyla ilgili yapılan çalışmalar

Yazarlar	Boyut	Ağ yapısı ve modeli	Akış modelleri, türbülans modeli	Deneysel karşılaştırma
Ghazanfarian ve Ghanbari (2014)	2B, bütün dişli pompa	Dinamik ve yapılandırılmamış sayısal ağ	k-ε türbülans	Değişik diş ucu-gövde boşluklarında farklı çıkış basınçlarında debi karşılaştırılmıştır.
Houzeaux and Codina (2007)	2B bütün, 3B yarım dişli pompa (giriş bölgesi)	Dişli boşluklarında yapılandırılmış, geri kalan kısımlarda yapılandırılmamış sayısal ağ. Belli zaman adımlarında yeni sayısal ağ oluşturuluyor.	Spalart-Allmaras tek denklemler türbülans modeli	Yok
Castilla vd. (2010)	Sadece giriş bölgesi	Şekil değiştiren (deforming mesh) ve yeni- yerleştirmeli (mesh replacement) ağ yapısı	Standart k-ε, gerçekleştirilebilir k-ε, RNG k-ε ve Reynolds Stress Modelleri (RSM)	Hız profillerini karşılaştırmıştır.
Castilla vd. (2015)	3B yarı geometri ve 2B	Belli zaman aralıklarında kullanılacak 150 farklı şekil değiştiren sayısal ağ	Türbülans modeli (Hangi türbülans modeli kullanıldığı belirtilmemiş.)	Girişe yakın bir noktadaki giriş basıncında, bir tur süresince hız değişimi karşılaştırılmıştır.
Strasser (2007)	2B	Şekil değiştiren (deforming mesh)	Laminer, çok fazlı	Yok

Dıştan dişli pompalarda, diş ucu ile gövde duvarı arasındaki mesafenin ve iki dişlinin temas ettiği bölgedeki mesafenin 100 mikron ve altı boyutlarında olmasından dolayı, tüm pompa için oluşturulan sayısal ağın hücre sayısı çok fazla artıp, 3B zamana bağlı HAD simülasyonlarının çözüm süresini uzatmaktadır. Bu sebeple basitleştirilmiş analitik denklemler hala tasarım için kullanılmaktadır. Teorik kaçak ve hacimsel yer değiştirme hesaplamaları çoğunlukla literatürde tam gelişmiş Couette akış varsayımlarıyla gerçekleştirilmiştir (Koç vd., 1985, Schiffer vd. 2013). Tam gelişmiş akış, viskoz kuvvetlerin diğer kuvvetler ile dengede olmasından dolayı akış boyunca hız dağılımının değişmemesi ile ortaya çıkar. Bu varsayımların geçerliliğinin tespiti, bu denklemlerle tasarım ve analiz yapanlar için önemli bir bilgidir. Teorik kaçak ve hacimsel yer değiştirme analizinin HAD simülasyonları ile geçerliliğinin nicel olarak incelenmelidir. Çünkü HAD simülasyonları, pompanın içerisindeki akışı daha detaylı ve hassas bir şekilde incelenmesini sağlayarak teorik hesaplamayı ve teorisinin sınırlarını gözlemlemeye yardımcı olacaktır.

Üç boyutlu (3B) zamana bağlı HAD simülasyonları uzun zaman kullanılabilir güçlü yüksek performans bilgisayarları gerektirmektedir. Bu çalışmada, diş ucu kaçaklarının detaylı bir şekilde sayısal olarak incelenebilmesi için daha az kaynak kullanan yeni bir 2B HAD analiz yöntemi geliştirilmiştir. Teorik hesapların geçerliliği, akış yapıları ve akış karakteristikleri bu yöntemle incelenmiştir. Ayrıca, pompa gövdesi üzerindeki sürtünme nedeniyle meydana gelebilecek sıcaklık etkisinin, akışkanın dinamik viskozitesini azaltıp kaçakları arttıracak düşünülmemektedir. Bu etkide geliştirilen HAD analiz yöntemi ile gösterilip incelenmiştir.

Terminoloji

b	Yüz genişliği (m)
E	Birim kütledeki toplam enerji (kJ/kg)
f_b	Ortamda birim hacme etkiyen bileşke gövde kuvvetleri (N/m ³)
h	Film kalınlığı (m)
L	Tepe boyu (m)
n	Duvarla temas halinde olan diş sayısı
p	Basınç (Pa)
q	Isı akısı (W/m ²)
r_d	Dişli yarıçapı (m)
S_E	Birim hacimdeki enerji kaynağı (kJ/m ³)
t	Time (s)
T	Sıcaklık (°C)
T_v	Viskoz stres tensörü (N/m ²)
U	Hız (m/s)
v	Ortam hızı (m/s)
y	Dişli gövdesinden dikey olarak uzaklık (m)
ρ	Öz kütle (kg/m ³)
σ	Stres tensörü (N/m ²)
μ	Dinamik viskozite (Pa.s)
ΔP_t	Basınç farkı (Pa)
η	Dinamik viskozite (Pa.s)
ω	Dönüş hızı (rad/s)
Φ	Enerji yitimi (W/kg)

2. Analiz Yöntemleri ve Test Koşulları

Bu çalışmada, akış simülasyonları Star-CCM+ 12.04.011 ile yapılmıştır. STAR-CCM +, çok çeşitli akış rejimlerinde ve çeşitli akışkan tipleri için iç ve dış akışları sonlu hacim yöntemi kullanarak çözülebilmektedir. Sıkıştırılmaz ve sıkıştırılabilir akışkan akışları için kütle, momentum ve enerji koruma denklemlerini çözer. Bu denklemler, sırasıyla aşağıda gösterilmiştir:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_V \rho dV \right) + \oint_A \rho \mathbf{v}_r \cdot d\mathbf{a} = \int_V S_u dV \quad (kg/s) \quad (1)$$

denkleminde, ρ özkütleyi (kg/m³) v ise ortam hızını (m/s) temsil etmektedir. S_u ise birim hacimdeki kütle kaynağıdır (kg/m³).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_V \rho \mathbf{v} dV \right) + \oint_A (\rho \mathbf{v}_r \otimes \mathbf{v}) \cdot d\mathbf{a} \\ = - \oint_A p \mathbf{I} \cdot d\mathbf{a} + \oint_A \mathbf{T}_v \cdot d\mathbf{a} - \int_V \rho [\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{v} - \mathbf{v}_t)] dV \\ + \int_V \mathbf{f}_b dV \quad (N) \end{aligned} \quad (2)$$

denkleminde \otimes Kronecker çarpanını, p basıncı, T_v viskoz stress tensörünü, f_b ise ortamda birim hacime etki eden bileşke gövde kuvvetlerini temsil etmektedir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho E dV + \oint_A [\rho H \mathbf{v}_r + \mathbf{v}_g p] \cdot d\mathbf{a} \\ = - \oint_A \dot{q}'' \cdot d\mathbf{a} \\ + \oint_A \mathbf{T}_v \cdot \mathbf{v} d\mathbf{a} + \int_V \mathbf{f}_b \cdot \mathbf{v} dV + \int_V S_E dV \quad (J) \end{aligned} \quad (3)$$

denkleminde E birim kütledeki toplam enerjiyi, q ısı akısını ve S_E ise birim hacimdeki enerji kaynağını temsil etmektedir.

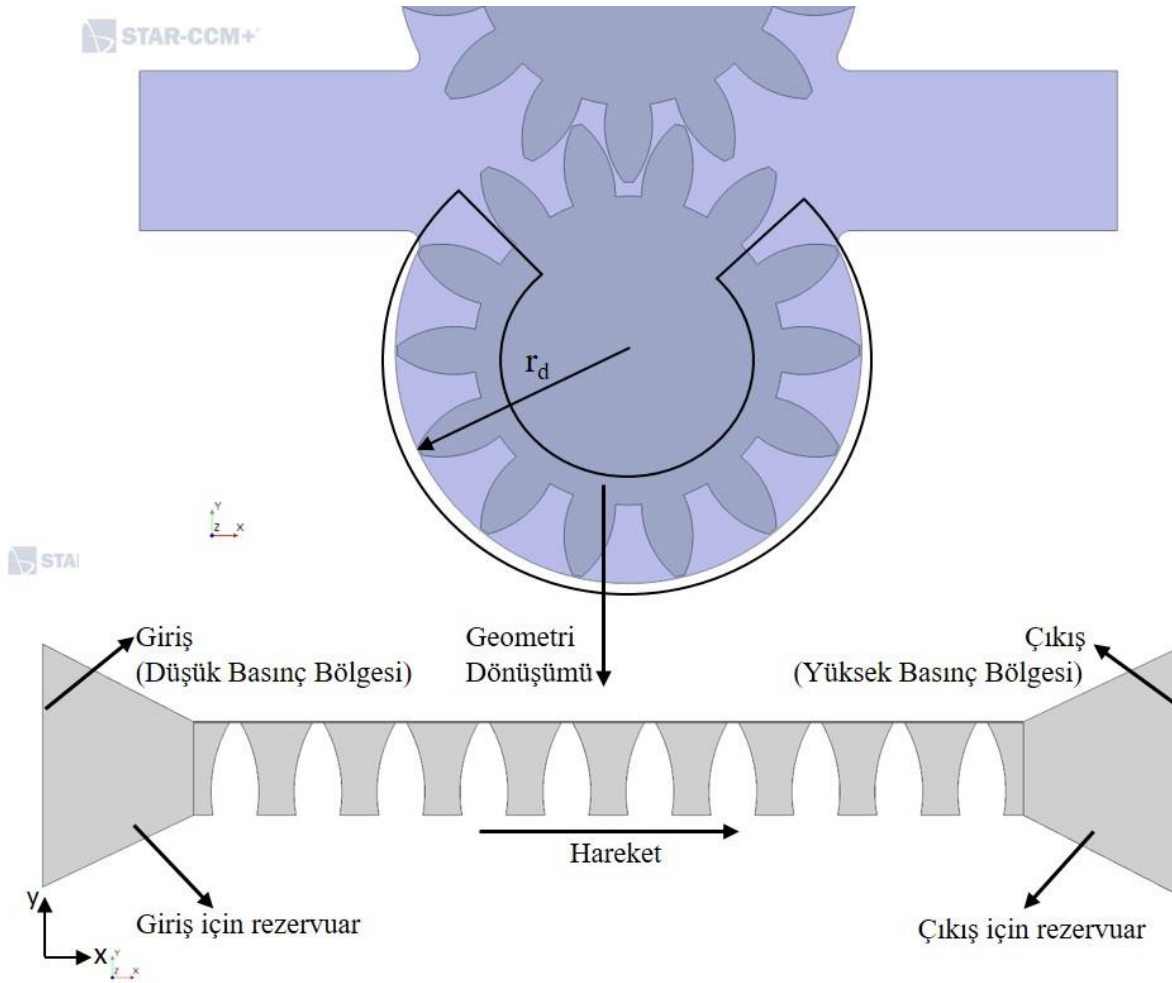
Dıştan dişli pompanın, Özyeğin Üniversitesi'nde bulunan Xeon i5 -2640 v4 işlemcisine sahip yüksek performanslı bilgisayarda 84 çekirdekte yapılan 3B HAD simülasyonunda, pompanın bir tur dönmesi için gereken süre yaklaşık 2 ay olduğu görülmüştür (İmamoğlu,2019). Bu çalışmada, 24 farklı durum için yapılacak simülasyonlarda gereken süre 48 aya yani 4 yıla ulaşmaktadır. Sürelerin bu kadar uzun olmasının en önemli nedeni; duvar ve diş tepeleri arasındaki mesafenin, yukarıda bahsedildiği gibi, 100 mikron ve altı seviyelerinde olması ve diğer yerlerde boyutlar santimetre ölçülerine ulaşabilmektedir. Mikron ölçüsündeki boyutlar, küçük ağ hücrelerine, çok sayıda sayısal ağ hücresine, kısa zaman basamağına ve çok uzun hesaplama süresine neden olur. Sayısal

ağ hücre sayısını ve hesaplama süresini azaltmak için, bu çalışmada akışın simülasyonları için dişli pompanın geometrisi basitleştirilmiştir. İki rezervuar ve duvar ile temas halinde olan 10 diş içeren akış alanının geometrik görüntüsü Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu basitleştirilmiş geometri, dişli yarıçapı temel alınarak oluşturulmuştur. Akış alanının boyutları Tablo 1'de verilmiştir. Aslında her dişlide 14 diş vardır; Ancak bu çalışmada 10 diş incelenmiştir. Çünkü uç kaçakları sadece duvarla temas halinde olan bölgede gözlenmiştir ve 10 diş içermektedir. Dişli hareketinin akış üstündeki etkisi, diş duvarına doğrusal öteleme hareketi sınır şartı kullanılarak sağlanmıştır.

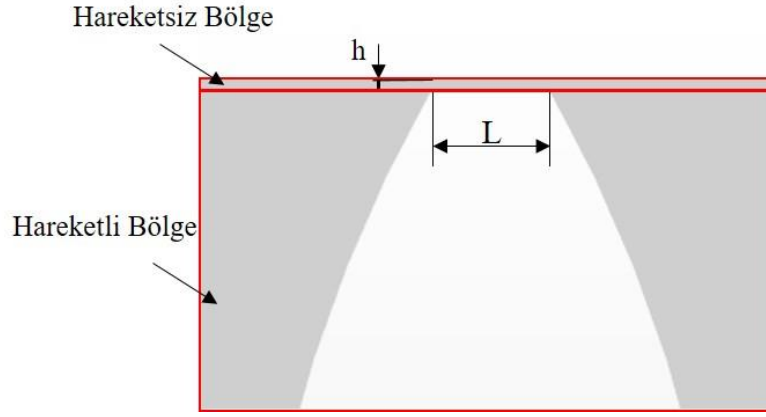
Geometri dönüşümü sırasında bir eksen çevresindeki dönmenin doğrusal harekete çevrilmesinin akış üstündeki yaratacağı farkı kontrol etmek için öncelikle Rossby sayısına bakılmıştır. Rossby sayısı, atalet kuvvetlerinin “coriolis” kuvvetlerine oranını belirtmektedir ve aşağıda denklemi verilmiştir.

$$Ro = \frac{U}{\omega h} \quad (4)$$

U akışkanın hızı (m/s), ω pompanın dönme hızı (rad/s), h ise diş tepesi ile duvar arasındaki film kalınlığıdır. Film kalınlığının mikron seviyelerinde olmasında dolayı (Tablo 2); Rossby sayısı minimum 3191 ($U = 5$ m/s, $\omega = 41$ rad/s, $h = 36.3$ μ m) olarak hesaplanmıştır. Bu da, atalet kuvvetlerinin “Coriolis” kuvvetlerine daha baskın olduğunu ve Coriolis etkisinden kaynaklı bir radyal akışın diş ucu-duvar arasındaki akışta ihmal edilebileceğini göstermektedir. Diğer bir değişle, bu çalışmada hesaplanan kaçak akış üstüne etkisinin ihmal edilebileceğini göstermektedir. Bunun yanında, yarıçap ve film kalınlığı oranı 239 olduğundan, akış düz zemin üzerindeymiş gibi davranacağı varsayılmıştır. Koç ve Canbulut (1985) da kaçak hesaplarını düz bir yüzey üzerinde akış varmış gibi Couette akış denklemlerini kullanmış ve teorik hesaplamalarını yapmıştır.



Şekil 1. Geometri dönüşümü ve akış alanının geometrik görünümü



Şekil 2. Akış alanındaki geometrik ölçüler ve hareketli-hareketsiz bölgeler

Tablo 2. Akış alanının ölçüleri

Sembol	Tanımı	Birim	Ölçü
h	Film kalınlığı	μm	36.3
b	Yüz genişliği	mm	10
L	Tepe boyu	mm	0.371
r_d	Dişli yarıçapı	mm	8.69

Akış, sıkıştırılmaz ve laminer (Türbülans modeli kullanılmadan yapılan doğrudan simülasyon) olarak modellenmiştir. Laminer akış varsayımı, bu çalışmada, diş-ucu ve gövde duvarı arasındaki akışın Reynolds sayısı 131 ve 370 olmasına dayandırılmıştır. Ayrıca, bu çalışma bir iç akış problemi olarak değerlendirildiği için, kaçak alanı olan diş tepesi ve duvar arasındaki her yer sınır tabakadır ve bu alanda viskoz etkiler baskındır. Viskoz etkileri daha iyi gözlemleyebilmek için, bu bölgede iki duvar arasında 20-25 hücre, kullanılmıştır. Akışkan olarak su kullanılmıştır. Suyun özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Sayısal akış simülasyonları, için ikinci derece kapalı (implicit) zamana bağlı çözücü kullanılmıştır. Zaman aralığı 0.1 μs olarak ayarlanmıştır. Böylece, Courant sayısı 1'in altında tutulmuştur. Giriş ve çıkış sınır şartları, basınçlı giriş ve çıkışı olarak modellenmiştir. Kalan sınırlar duvar olarak modellenmiştir. Referans basıncı ve giriş basıncı sırasıyla 1 bar ve 0 bar verilmiştir. Çıkış basıncı göstergesi (gauge) basıncı olarak 2, 5, 8, 10 bar verilmiştir. Dönme hızları 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600 rpm'dir. Hareketli gövde ve sabit bölge olarak iki bölge vardır (Şekil 2). Hareketli gövde dişlileri ve hacim paketlerini içerir. Sabit gövde iki rezervuar ve dişler ile duvar arasındaki bölgeyi içerir. Öteleme referans sistemi kullanılarak, hareketli gövdeye +x yönünde hareket tanımlanmıştır. Böylece, bölgenin hareket ediyormuş gibi çözülmesi sağlanmıştır. Akış simülasyonlarında, yukarıda anlatıldığı gibi pompa yatay olarak çizildiğinden her bir dönme hızına karşılık gelen öteleme hızı hesaplanmıştır ve hareketli bölge için bu hızlar sırasıyla tanımlanmıştır.

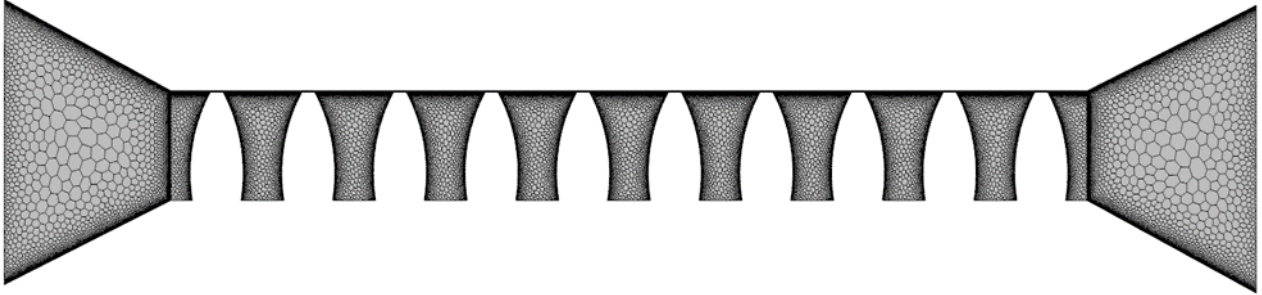
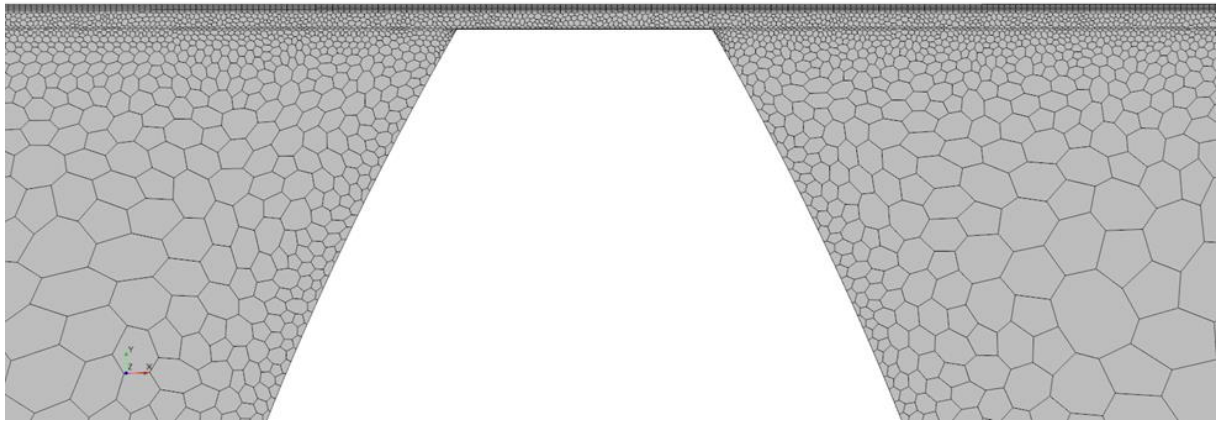
Tablo 3. Suyun özellikleri

Sembol	Tanımı	Birim	Ölçü
ρ	Öz kütle	kg/m^3	997,56
η	Dinamik viskozite	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	$8,8871 \times 10^{-4}$

Star-CCM+ 'da bulunan parça bazlı sayısal ağ, hücre üretimi için kullanılmıştır. Hareketli bölge ve sabit bölge için yapılandırılmamış 2B çokyüzlü örüntü oluşturulmuştur. Ayrıca, prizma tabakası ağı, duvara yakın bölgede daha hassas sonuçların gözlemlenmesi, hücre sayısının ve hesaplama süresinin azaltılması için kullanılmıştır. Bu çalışmada, iki boyutlu ve 5 bar-1400 rpm koşullarındaki akış simülasyonları için sayısal ağ bağımlılığı çalışması yapılmıştır. Sırasıyla, toplam hücre sayısı 63819, 76971, 106163, 162406 ve 207891 olan akış simülasyonları çalıştırılmıştır. Tablo 4'te gösterildiği üzere, denklem (5) temel alınarak tüm bu simülasyonlar karşılaştırılmıştır. Tüm bu simülasyonlarda elde edilen uç kaçığı değerleri, toplam debi verimi olarak kıyaslandığında; her ne kadar %3 kadar bir fark görünse de, sonuçlar bölümünde (Şekil 7) teorik değerler ile sayısal yöntem elde edilen değerler arasındaki farkla karşılaştırıldığında bu fark bir önem arz etmemektedir. Bu yüzden, toplam hücre sayısı 106163 olan akış simülasyonları tüm çözümlerde esas alınmıştır. 1061363 hücrenin; 38217'si hareketli gövdeye ve 67946'sı sabit gövdeye aittir. Tüm akışkan alanın sayısal ağ görüntüleri ve diş ucu ile duvar arasındaki sayısal ağ görüntüleri sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. 5 bar-1400 rpm koşullarında farklı toplam hücre sayılarında uç kaçak değerleri

Toplam Hücre Sayısı	Uç Kaçak (kg/s)	Debi Verimi
63819	0.00362	%73.2
76971	0.00366	%72.8
106163	0.00380	%71.8
162406	0.00388	%71.2
207891	0.00399	%70.4

**Şekil 3.** Tüm akış alanının örüntü görünümü**Şekil 4.** Diş ve duvar arasındaki alanın örüntü görünümü

Teorik hesaplamalar, Koç ve Canbulut (1985)'ün diş ucu kaçak denklemi kullanarak yapılmıştır. Diş ucu kaçağı hacim akış oranının denklemi aşağıdaki gibidir:

$$Q = \frac{b \cdot h^3 \cdot \Delta P_t}{12 \cdot n \cdot \eta \cdot L} - \frac{b \cdot \omega \cdot r_d \cdot h}{2} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (5)$$

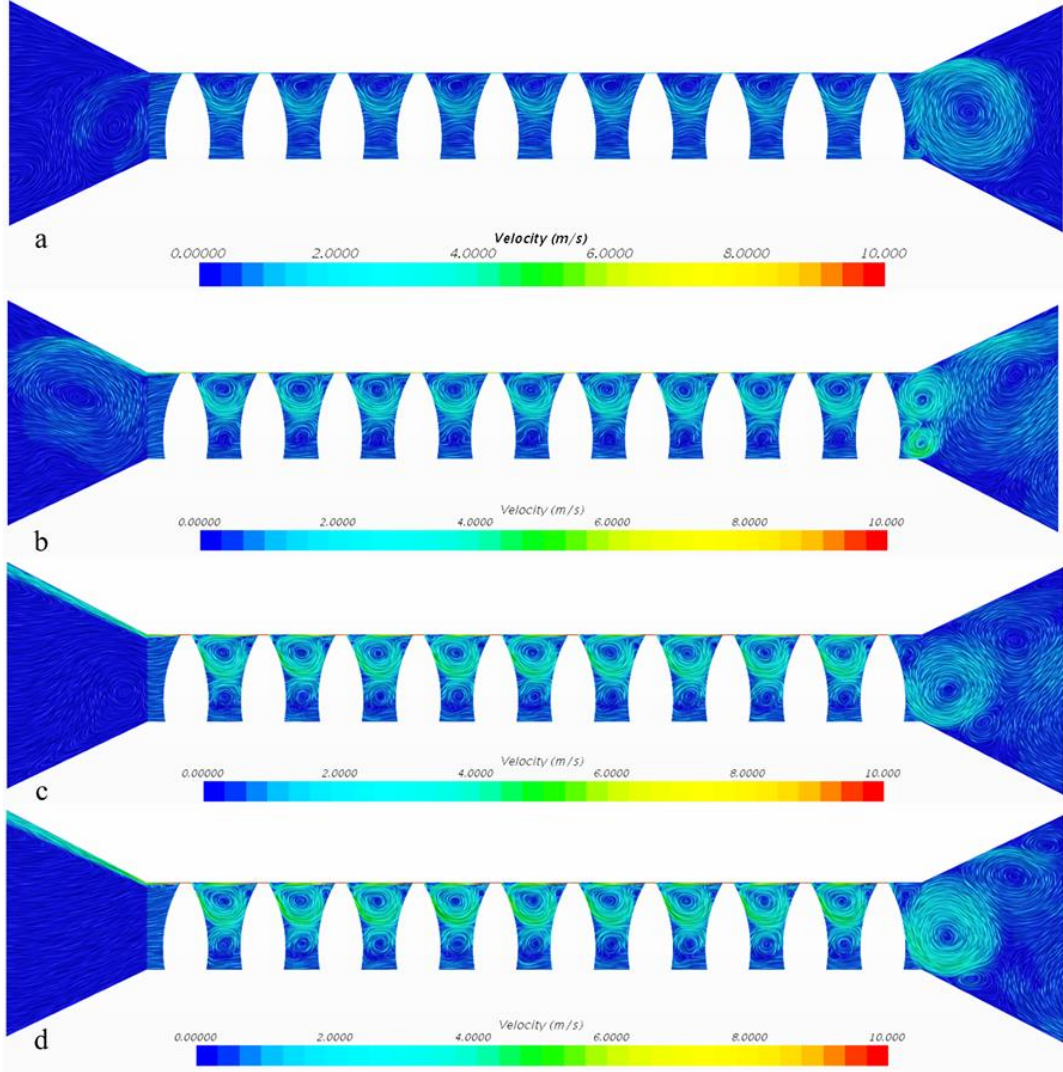
b yüzey genişliği (m), h film kalınlığı (m), ΔP_t basınç farkı (Pa), r_d dişli yarıçapı (m), L tepe boyu (m), η dinamik viskozite (Pa·s), ω dönüş hızı (rad/s) ve n sayısı duvarla temas halinde olan dişleri temsil etmektedir. L , b , h , η , r_d ve n sabittir. Basınç farkı ve dönüş hızı değiştirilmiştir ve diş ucu kaçağına nasıl etki edeceği gözlemlenmiştir. Denklem, Couette akışı esas alınarak oluşturulmuştur. Couette akış, bir tanesi diğerine göre teğet olarak hareket eden iki yüzey arasındaki boşlukta oluşan viskoz akıştır. İlk terim, basınç farkından dolayı girişe kaçan akışkan miktarını temsil eder; ikinci terim, diş ucuna viskoz yapışmaya bağlı olarak çıkışa hareket ettirilen akışkan miktarını temsil eder.

$$\eta = 2,4857 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 - 3,4276 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 1,7779 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 4,1167 \cdot 10^{-3} \cdot T^1 + 0,35987 \quad (\text{Pa.s}) \quad (6)$$

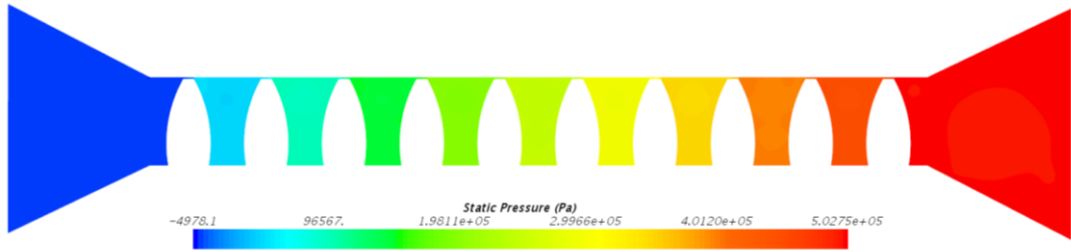
3. Sonuçlar

Dişli pompasının hız vektörü görüntüleri, 800 rpm durumunda 2, 5, 8, 10 bar için Şekil 5'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, dişler arasındaki boşluklarda burgaçlar, diş ucu kaçakları önceki dişe geri dönmeye çalışırken, arka hacim paketi tarafından kaçan akışkanın geri itilmesi nedeniyle oluşmaktadır. Şekil 5 (a) 'da, bir burgaç duvarın yanında 2 bar'da meydana gelmiştir. Daha yüksek basınçlarda, ikici burgaç oluşmuş ve artan basınçla daha da belirgin hale gelmiştir (Şekil 5 (b-d)).

Şekil 6'da 5 bar, 1400 rpm'de basıncın beklenildiği gibi arttığı gözlemlenebilir. Şekil 7'de ise girişten çıkışa kadar dişli tepelerine yakın bir çizgi boyunca basınç dağılımı gösterilmiştir. Platolar iki diş arasındaki boşluğa denk gelmektedir. Diş üstünde statik basınç değişimi ani olarak gerçekleşmektedir.



Şekil 5. 800 rpm'deki hız vektörü görüntüleri (a) 2 bar, (b) 5 bar, (c) 8 bar, (d) 10 bar

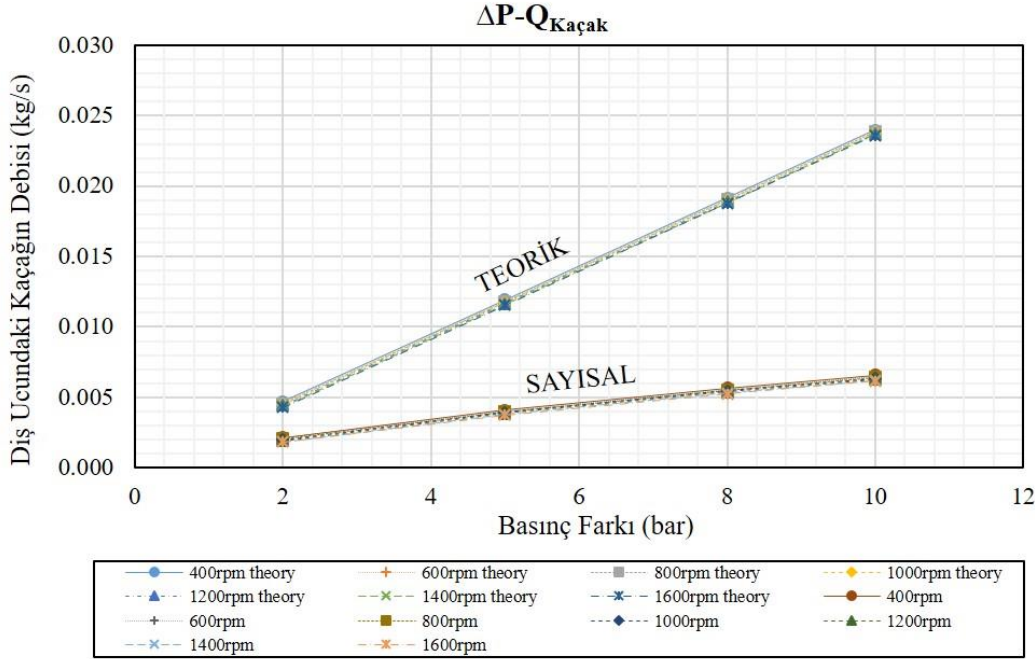


Solution Time 0.0300045 (s)

Şekil 6. 5 bar 1400 rpm'de dişli pompadaki statik basınç dağılımı

Bu çalışmada, diş ucu kaçağı için teorik hesaplamalar denklem (4) kullanılarak Şekil 1'de gösterilen geometri için yapılmıştır. Akış simülasyonlarında, yukarıda belirtilen basınç farklarında ve dönme hızlarında uç kaçaqları hesaplanmıştır. Akış simülasyonları ve teorik hesaplamaların karşılaştırılması Şekil 7'de gösterilmiştir. Denklem 5'e göre, dönme hızı arttığında diş ucu kaçağının azalması beklenir. Şekil 7 'de görüldüğü gibi; sabit basınçta, dönme hızı 400'den 1600'e yükseltildiğinde diş ucu kaçağı sadece %4 azalmıştır. Fakat, sabit dönme hızında her basınç artışında diş ucu kaçağı katlanarak artmaktadır. Bu yüzden, dönme hızından kaynaklı diş ucu kaçağındaki değişim, basınç farkından kaynaklı değişime oranla çok küçüktür.

Şekil 7’de gözlemlendiği üzere, 2 bardaki teorik hesaplamalar sayısal akış simülasyonlarından iki kat daha fazladır ve bu fark basınç yükseldikçe artmıştır. Akış simülasyonlarında basıncın 2 bar’dan 10 bar’a çıkması durumunda kaçak debisi üç kat artmıştır. Ama teorik hesaplamalarda kaçak debisi beş kat artmıştır. Sonuç olarak, teorik hesaplamalar ve akış simülasyonlarının arasında büyük bir fark vardır.

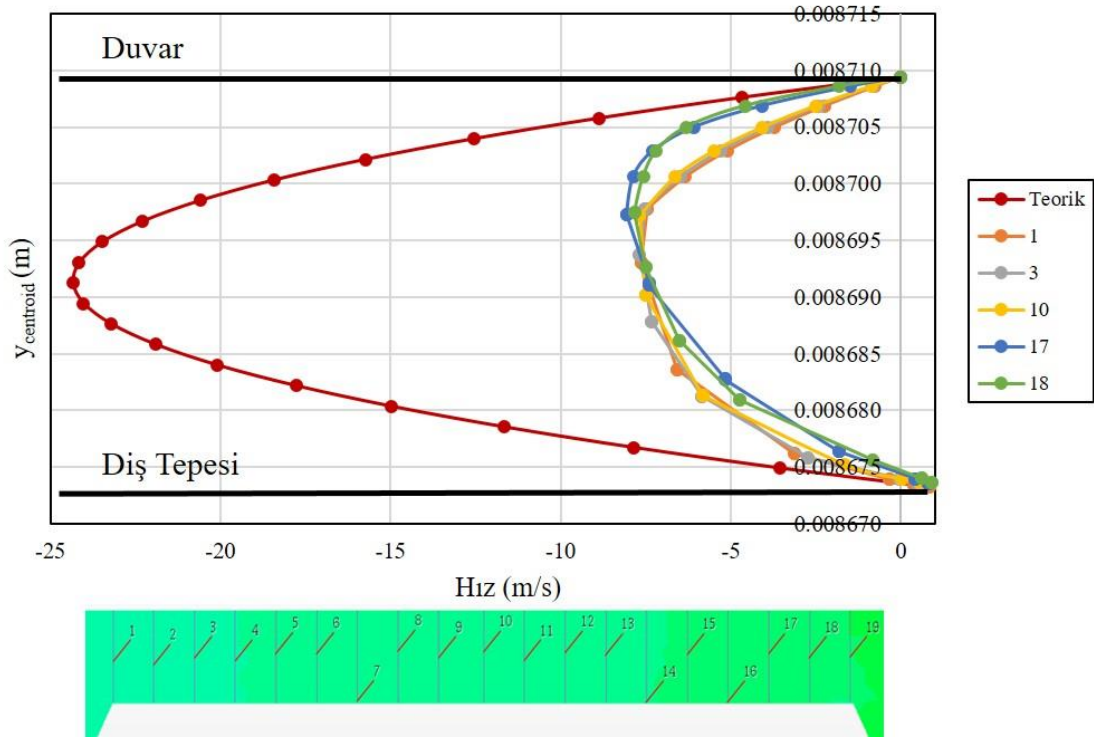


Şekil 7. Akış simülasyonlarıyla teorik dış ucu kaçığı hesaplamalarının karşılaştırması

Uç kaçıklarının teorik hesaplamaları, tam gelişmiş Couette akış varsayımına dayalı olarak yapılmıştır. Tam gelişmiş akış olup olmadığını gözlemek için, bu alanda dişlinin orta dişinde, Şekil 8’de gösterildiği gibi, 19 adet düzlemsel kesit oluşturulmuştur. Her bir kesit için hız profilleri oluşturulmuş ve bunlar tam gelişmiş Couette akış denklemleri kullanılarak hesaplanan teorik hız profili ile karşılaştırılmıştır.

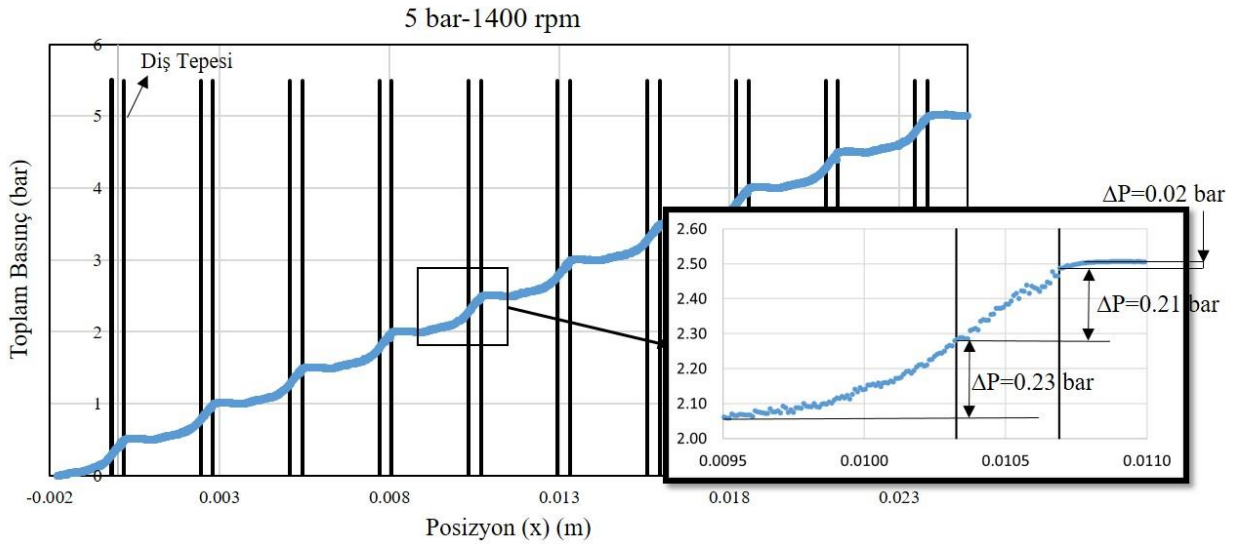
$$U(y) = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial P}{\partial x} (y^2 - hy) + \frac{y}{h} U_{diş_tepesi} \quad (m/s) \quad (7)$$

Şekil 8’deki teorik hız profil hesabı için $\frac{\partial P}{\partial x}$, 5 bar’lık bir basınç farkında teorik olarak her diş tepesinde eşit bir şekilde oluşması gereken 0.5 bar’lık basınç farkının diş tepesi uzunluğuna (L) bölünmesi ile hesaplanmıştır. Dış ucu kaçak debisi (Q) (Denklem 4), bu hız profilinin y- yönünde integralinin alınması ile oluşturulmuştur. Şekil 8’de gösterilen beş düzlemdeki hız profillerinin hiçbiri tam gelişmiş akışla eşleşmemektedir. Hatta, yüksek basınç tarafındaki hız profillerinde (17 ve 18.profil) belirgin bir asimetri vardır. Bu asimetri, Şekil 5 ve 12’den anlaşılacağı gibi yüksek basınç tarafındaki akışın dişli gövde arasındaki boşluğa girmeden önce burgaçlı bir yapıya sahip olması ve bu boşluğa girerken oluşan kopmaların sonucudur. Yani akış, boşluğun başında, Couette akış teorisinde varsayıldığı gibi, duvara tam paralel değildir. Bu sonuçlar, varsayımın doğru olmadığını ve Couette akış denklemleri ile hesaplanan profilin gerçeği yansıtmadığını göstermiştir.

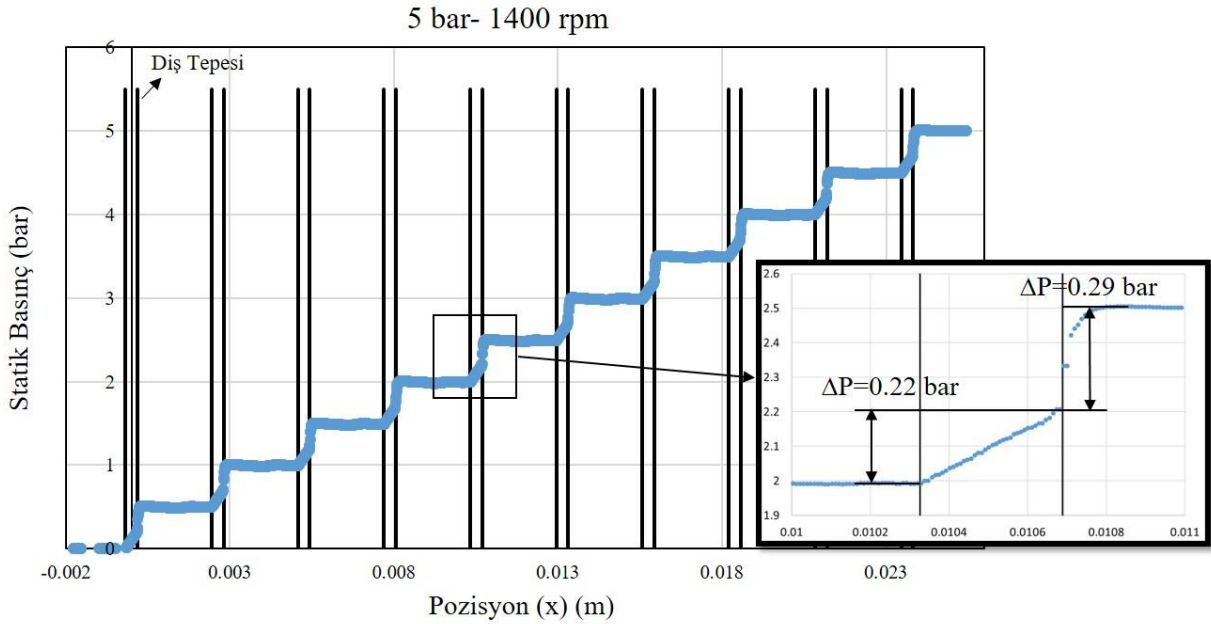


Şekil 8. Diş ucu ve duvar arasındaki teorik ve bazı düzlemsel kesitlerin hız profillerinin karşılaştırması (5 bar, 1400 rpm)

Şekil 9 ve Şekil 10'da, 5 bar 1400 rpm durumdaki akış simülasyonlarında girişten çıkışa doğru toplam ve statik basınç değişimi gösterilmiştir. Toplam basınçta oluşan farklar viskoz kayıplara işaret etmektedir. Kaçak akışın dişin hareket yönünün tam tersine doğru olduğu göz önünde bulundurularak bu sonuçlar değerlendirildiğinde, dişlinin sağ tarafında (kaçak akış girişi) 0,02 bar, sol tarafında ise 0,23 bar'a karşılık gelen viskoz kayıp olduğu gözlemlenmiştir. Diş tepesi ve gövde arasında ise sadece 0,21 bar'lık bir kayıp gerçekleşmiştir. Şekil 10'daki, dişlinin sağ tarafında oluşan 0,29 bar'lık statik basınç düşüşü, 0,02 bar'lık viskoz kaybın ve 0,27 bar'lık hızlanma kaynaklı dinamik basınca dönüşmenin sonucudur. Dişlinin solunda, statik basınçta hiçbir değişiklik olmaması da, toplam basınçtaki 0,23 bar'lık düşüşün dişli gövde arasından çıkan akışkanın dinamik basıncının tamamıyla viskoz kayba dönüştüğünü göstermektedir. Disli ve gövde arasında oluşan 0,21 bar'lık toplam basınç farkı ve 0,22 bar'lık statik basınç farkı arasındaki 0,01 barlık fark ise hızlanma kaynaklı dinamik basınç değişiminden ileri gelmektedir. Sonuç olarak 5. diş tepesindeki basınç farkı 0,21 bar'dır. Fakat 5 bar'lık bir basınç farkında teorik olarak her diş tepesinde eşit bir şekilde ve 0,5 bar'lık bir fark Couette denklemlerinde tasarım için kullanılmaktadır. Yani, iki diş tepesi arasında, dişlinin kaçak çıkışı ve girişi bölgesinde teoride değerlendirilmeyen basınç kaybı oluşmaktadır.



Şekil 9. 5 bar 1400 rpm'de girişten çıkışa tüm dişli tepelerindeki toplam basınç dağılımının grafiği

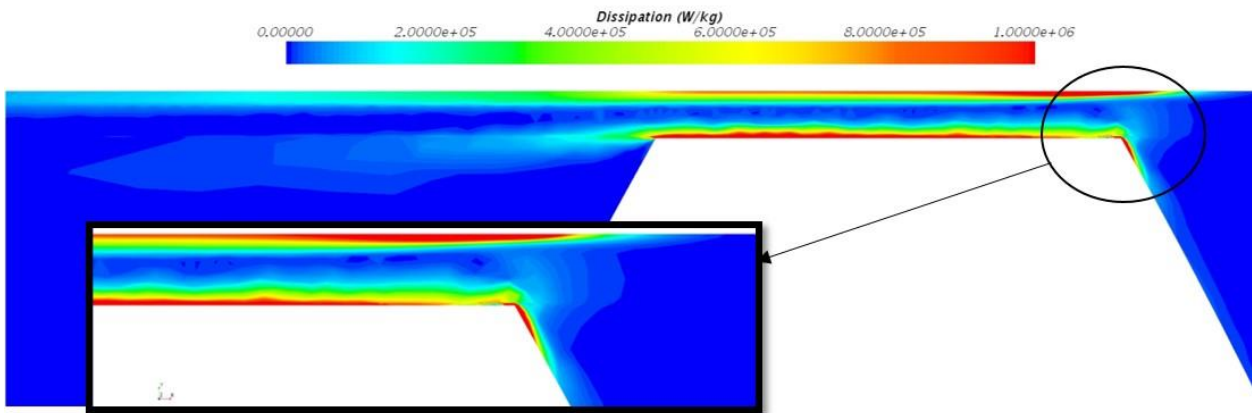


Şekil 10. 5 bar 1400 rpm’de girişten çıkışa tüm dişli tepelerindeki statik basınç dağılımının grafiği

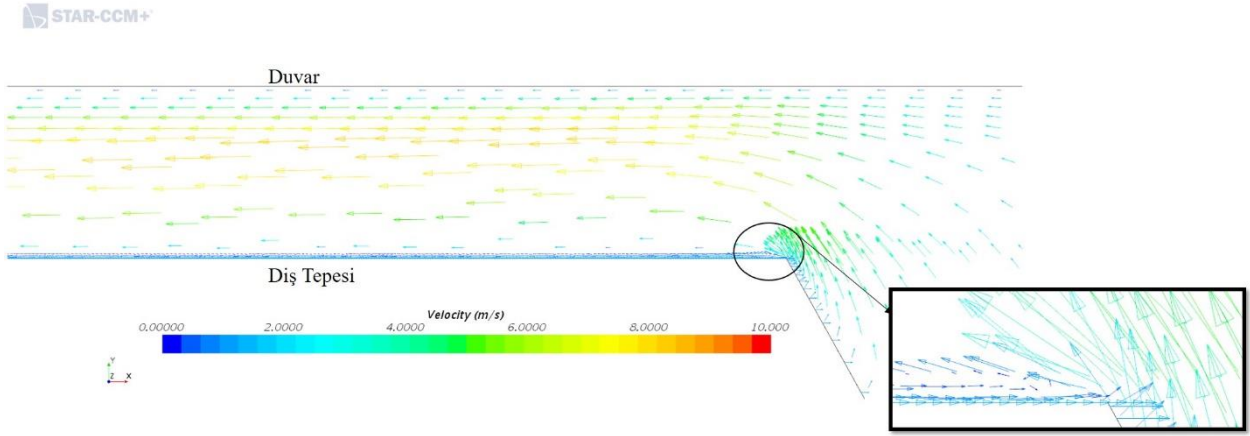
Basınç değişiminin sebebini daha iyi anlayabilmek için akış simülasyonlarında diş tepelerindeki enerji enerji yitimine bakılmıştır. Sıkıştırılmaz akış için geçerli olan mekanik enerji korunumundaki, enerji yitimi terimi aşağıdaki gibidir;

$$\Phi = \frac{2\mu}{\rho} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right) \left(\frac{W}{kg} \right) \quad (8)$$

Şekil 11’de, ortadaki diş tepesinde ve diş tepesinin kaçak girişinde enerji yitimi gösterilmiştir. Özellikle duvar kenarında, enerji yitimi iki diş arasındaki bölgenin ortalarına kadar görülmektedir. Bu da, diş tepeleri arasındaki basınç düşüşünü açıklamaktadır. Diş tepesinin kaçak girişi ve çıkışında (sırasıyla sağ ve sol taraf), enerji yitimi yoğun bir şekilde gözlemlenmiştir. Şekil 12’de diş tepesinin yine aynı noktasında, hız vektörleri bir akış ayrılması göstermektedir. Bu ayrılma, akışın gövde tarafına sıkışmasına neden olduğu için gövde duvarındaki enerji yitimine artırıcı yönde etki yapmıştır. Ayrıca, statik basınç düşüşü bu bölgedeki hızlanmadan ötürüdür. Kaçak çıkışı tarafında ise, dişli gövde arasında hızlanan kaçak akışın kinetik enerjisinin enerji yitimi görülmektedir. Bu noktada, Şekil 5’de görülen girdapların, kaçak akışın yarattığı kesme kuvvetleri ve kinetik enerjisi ile oluştuğunu belirtmek gerekir.

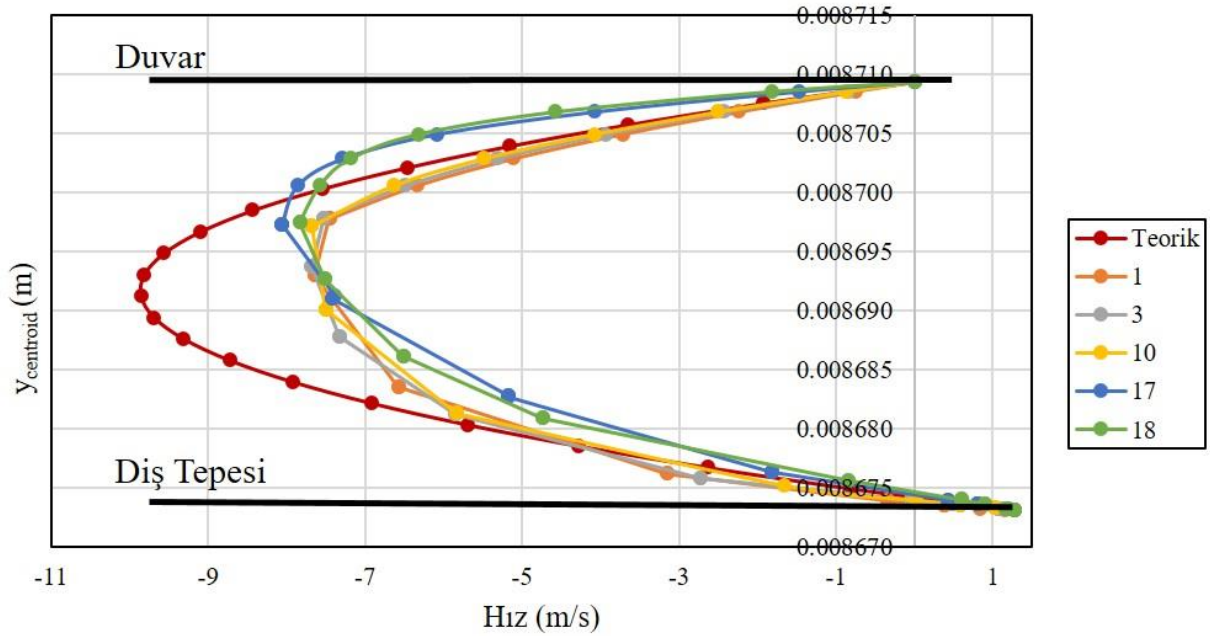


Şekil 11. 5 bar ve 1400 rpm koşullarında ortadaki dişli tepesi ve çevresinde enerji yitimi görünümü



Şekil 12. Diş tepesinin ucundaki hız vektörlerinde meydana gelen ayrılma (5 bar-1400 rpm)

Şekil 13'de, teorik hesaplamalar akış simülasyonlarındaki diş tepesindeki basınç farkı üzerinden yapılarak; yeni bir hız profili elde edilmiştir. Maksimum hız, 25 m/s'den 10 m/s'e düşmüştür. Her ne kadar, teorik tam gelişmiş Couette akış hesabı ve sayısal hesaplamalar arasındaki fark azalmış ise de, tam gelişmiş akış varsayımının tam olarak geçerli olmadığı görülmektedir. Bu uyumsuzluğun ana kaynağı, dişlinin sağında (kaçak girişi) meydana gelen düzensizlik ve bunun yarattığı viskoz kayıplardır.



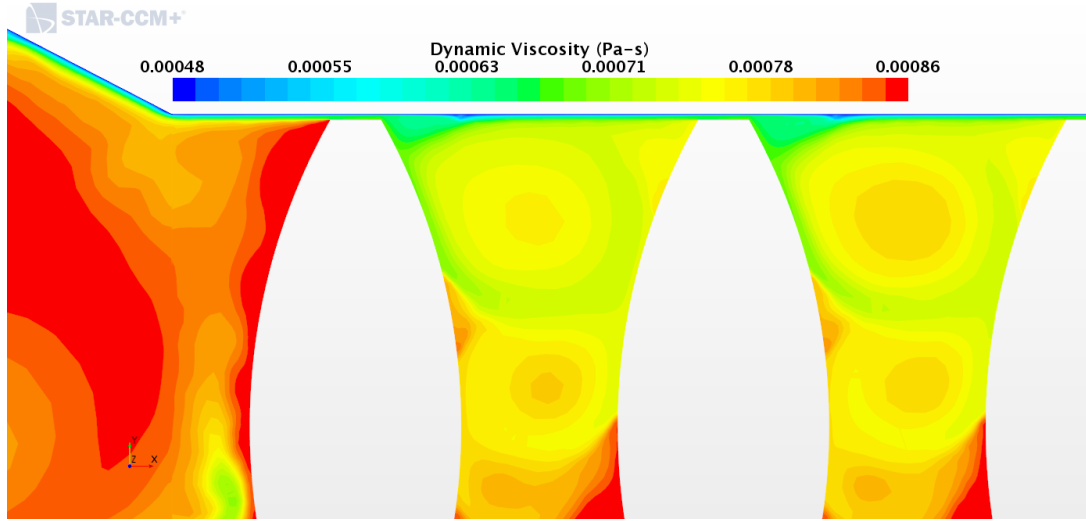
Şekil 13. Diş ucu ve duvar arasında bazı düzlemsel kesitlerin ve teorideki hız profillerinin karşılaştırması (sadece tam gelişmiş akış etkisi ve 5 bar, 1400 rpm durumunda)

Tablo 5'te, 3 farklı şekilde 5 bar ve 1400 rpm durumunda diş ucu kaçak debisi ve debi verimi hesaplanmıştır. Toplam debi 0,014 kg/s'dir. Sayısal basınç farkı üzerinden yapılan teorik hesaplama ile sadece tam gelişmiş akışın, teorik ile sayısal sonuçlar arasındaki etkisi görülmüştür. Tam gelişmiş akış kabulünden kaynaklı fark, %6 olarak görülmüştür. Diş tepesindeki enerji yitiminden doğan basınç kayıplarının sebep olduğu fark ise %52'dir.

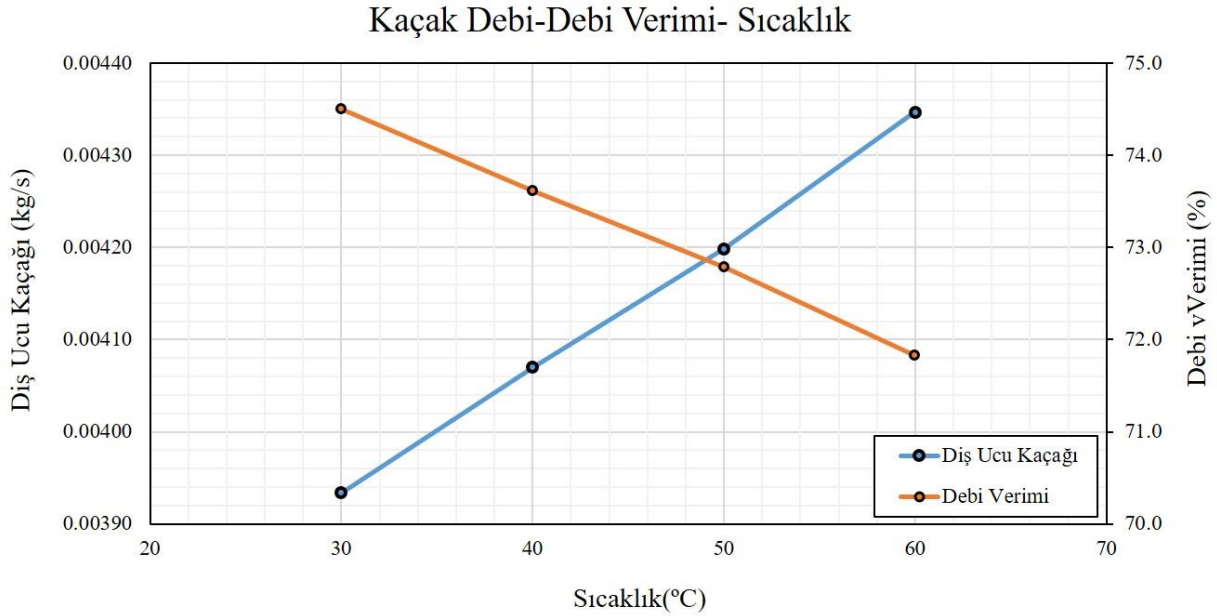
Tablo 5. 5 bar 1400 rpm durumunda teorik, sayısal ve sayısal basınç farkı değeri üzerinden hesaplanmış teorik diş ucu kaçak debilerin karşılaştırması

	Diş Ucu Kaçak Kütle Debisi (kg/s)	Toplam Debi Verimi
Teorik	0.0120	% 14
Sayısal	0.0038	% 72
Sayısal basınç farkı üzerinden hesaplanan teorik	0.0046	% 66

Sürtünme nedeniyle duvardaki sıcaklık artışı, dış ucu kaçağını arttıracakı düşünülmüştür. Çünkü sıcaklığın artması, akışkanın dinamik viskozitesini azaltmaktadır. Bu nedenle, dış ucu kaçağındaki sıcaklık etkisini gözlemek için aynı basınçta ve dönme hızında (5 bar ve 1600 rpm), çeşitli duvar sıcaklıkları için akış simülasyonları yapılmıştır. Akış simülasyonlarında, gövde duvarına sırasıyla 30-40-50-60 °C sabit sıcaklık ve dişli yüzeyinde adyabatik sınır koşulları verilerek, ısının iletimi ve taşınımı sadece akışkan içerisinde gerçekleştirilmiştir. Özellikle dişli uçları ve duvar arasında dinamik viskozite, Şekil 14'te gösterildiği gibi yüksek duvar sıcaklığı nedeniyle önemli ölçüde azalmaktadır. Dış ucundan sıcaklığı 60 °C olan duvara kadar dinamik viskozite yaklaşık %23 oranında azalmıştır. Başlangıç koşuluna göre ise, viskozite gövde duvarında %38 azalmıştır. Şekil 15'te, dış ucu kaçağına sıcaklık etkisi ve debi verimi gösterilmiştir. Grafik, her 10°C sıcaklık artışının, %10'luk bir uç kaçağı artışına neden olduğunu göstermiştir ve bu da %1 kadar debi verimini azaltmıştır.



Şekil 14. Dişli pompanın içerisindeki dinamik viskozitenin değişimi (T=60°C, 5 bar-1600 rpm)



Şekil 15. Dış ucu kaçağına gövde duvarı sıcaklığının etkisi ve debi verimi (5 bar-1600 rpm)

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, dış ucu kaçağı teorik ve sayısal hesaplarla karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Dıştan dişli pompaların karmaşık geometrisinden dolayı, akış simülasyonları iki boyutlu olarak bu çalışmaya özgü bir yöntemle basitleştirilerek yapılmıştır. Bu yöntemde; geometri, sadece dış ucu kaçağının gözlemlendiği bölgeye indirgenmiştir. Dairesel eğime sahip olan dişli- gövde arasındaki akış alanı düzleştirilerek, dönme hızları doğrusal hıza dönüştürülmüş ve akış aynı tasarım teorisinde kullanılan Couette akış denklemlerindeki gibi değerlendirilmiştir. Dişlilerin yanında bulunan rezervuarlar ise hacim paketlerinin alınıp taşındığı giriş ve çıkış havuzları temsil etmektedir.

Akış simülasyonları teorik hesaplamalar ile karşılaştırılarak, basitleştirilmiş Couette akış denklemleriyle yapılan teorik hesapların doğruluğu test edilmiştir.

Teorik hesaplamalar ve akış simülasyonları arasında bazı sapmalar gözlemlenmiştir. Bu sapmanın bir kısmı, dış tepelerindeki enerji yitiminden dolayı oluşan basınç kayıplarından kaynaklanmıştır. Sapmanın diğer kısmı ise, teorik hesaplamalarda tam gelişmiş akış varsayımına dayandığı gözlemlenmiştir.

Teorik olarak debi verimi %14 olarak hesaplanmıştır. Sayısal ve sadece tam gelişmiş akış varsayımının etkisinin görülmesi için yapılan sayısal basınç farkı değeri ile yapılan teorik hesaplamalarda debi verimi, sırasıyla %71 ve %66'dır. Dış tepesindeki enerji yitimi bu bölgede basınç kaybına yol açmaktadır. Basınç farkının 5 bar olduğu durumda her dışten sonra 0,5 bar artması gerekirken; ortalama 0,29 bar arttığı görülmüştür. Tam gelişmiş akış varsayımı ise, teorik ve nümerik hesaplamalarda %5'lik bir sapma meydana getirmiştir. . Bu sonuçlar aslında teorik kaçak denklemlerinin kaçacağı çok fazla hesapladığını göstermektedir. Başka bir deyişle, bu denklemlerle dişli pompaların dişli-gövde arası açıklığı olması gerektiğinden daha küçük tasarlanıp, üretim ve kullanım zorluklarına yol açabilir. Üretim kısmında mikron seviyelerde toleranslara inmek çok zordur ve inilebildiği söylene dahi malzeme yüzeyinde iyi bir taşlama yapılması gerekmektedir. Kullanım ile ilgili sonuçlarda ise, pompanın dış ucu-duvar ve dişli-pompa yüzeyi arasındaki ölçülerin çok küçük olmasından dolayı bu yüzeyler arasında sürtünme oluşmaktadır. Bu da, yüzeylerin ısınmasına ve dış ucu kaçaklarının artmasına sebep olabilmektedir.

Isınmış gövdeden akışkana geçen ısının dış ucu kaçığına etkisi de gösterilmiştir. Dış uçları ve duvar arasındaki sürtünmeden kaynaklanan duvar sıcaklığı arttıkça dinamik viskozite azalır. Bu, viskozite ile çıkışa iletilen akışkanın azaldığı anlamına gelir; böylece dış ucu kaçığı artar.

Bu çalışmanın takip eden aşamasında, tüm dişli pompa gövdesinin 3B akış simülasyonları gerçekleştirilerek dış ucu kaçaklarının yanı sıra yüz kaçakları araştırılacak ve teorik hesaplamalar ile karşılaştırılması planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu araştırmaya 115M093 projesiyle maddi destek sağladıkları için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ediyoruz.

Referanslar

Castilla, R., Gamez-Montero, P. J., Ertrk, N., Vernet, A., Coussirat, M., & Codina, E. (2010). Numerical simulation of turbulent flow in the suction chamber of a gearpump using deforming mesh and mesh replacement. *International Journal of Mechanical Sciences*, 52(10), 1334–1342. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2010.06.009>

Castilla, R., Gamez-Montero, P. J., del Campo, D., Raush, G., Garcia-Vilchez, M., & Codina, E. (2015). Three-Dimensional Numerical Simulation of an External Gear Pump With Decompression Slot and Meshing Contact Point. *Journal of Fluids Engineering*, 137(April), 41105. <https://doi.org/10.1115/1.4029223>

Devendran, R. S., & Vacca, A. (2013). Optimal design of gear pumps for exhaust gas aftertreatment applications. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 38, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2013.06.006>

Ghionea, G., Ioan, C., & Tiriplic, P. (2012). Simulation of the Working Conditions for a Gear Pump Using Finite Element Analysis Method, 2012(Xxvi), 21–28.

Ghazanfarian, J., & Ghanbari, D. (2014). Computational Fluid Dynamics Investigation of Turbulent Flow Inside a Rotary Double External Gear Pump. *Journal of Fluids Engineering*, 137(2), 21101. <https://doi.org/10.1115/1.4028186>

Houzeaux, G., & Codina, R. (2007). A finite element method for the solution of rotary pumps. *Computers & Fluids*, 36(4), 667–679. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2006.02.005>

[İmamoğlu D. \(2019\). Numerical and Theoretical Analysis of External Gear Pump, Master Thesis, Ozyegin University, İstanbul.](#)

Koç, E., & Canbulut, F. (1985). Pozitif Deplasmanlı Pompa ve Motorlarda İç Akışkan Kaçağı. Kayseri: Erciyes Üni, Fen Bilimleri Dergisi.

Schiffer, J., Benigni, H., & Jaberg, H. (2013). Development of a novel miniature high-pressure fuel pump with a low specific speed. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 227(7), 997–1006. <https://doi.org/10.1177/0954407013476820>

Strasser, W. (2007). CFD Investigation of Gear Pump Mixing Using Deforming/Agglomerating Mesh. *Journal of Fluids Engineering*, 129(4), 476. <https://doi.org/10.1115/1.2436577>

Yusuf, A. A., Wasbari, F., Zakaria, M. S., & Ibrahim, M. Q. (2013). Slip flow coefficient analysis in water hydraulics gear pump for environmental friendly application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 50(1), 12016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/50/1/012016>



Silindirle Sıkıştırılmış Beton Karışımlarında Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Properties of Materials Used in Roller Compacted Concrete Mixtures

Ali Mardani-Aghabaglou¹, Sultan Husein Bayqra¹, Süleyman Özen¹, Zia Ahmad Faqiri¹,
Kambiz Ramyar²

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa, TÜRKİYE

²Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35100, İzmir, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 23/05/2019

Kabul / Accepted: 17/09/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 27/09/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Son yıllarda dünya genelinde silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) teknolojisi yaygın şekilde kullanılmaktadır. SSB, düşük maliyeti ve hızlı yerleştirilebilmesi nedeniyle baraj ve yol inşaatlarında tercih edilmektedir. SSB, normal betonla aynı temel bileşenlere sahiptir ve aynı yöntemler kullanılarak üretilmektedir. Ancak, geleneksel betondan farklı olarak daha düşük miktarda çimento kullanılması yanı sıra kuru kıvamından dolayı silindirle sıkıştırılarak yerleştirilir. Bu çalışmada SSB'nin genel özellikleri ve SSB karışımlarında kullanılan çimentonun tipi, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi mineral katkıların özellikleri, agrega boyutları ve gradasyonu, su, kimyasal katkı ve lif kullanımının SSB karışımlarının özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bunun yanında söz konusu bu malzemelerin dünya üzerindeki SSB uygulamalarında kullanımlarından ve avantajlarından bahsedilmiştir. İncelenen çalışmalara göre, geleneksel beton karışımlarına kıyasla, düşük miktarda çimento kullanımı ile SSB karışımlarının hidrasyon ısısında azalmalar meydana gelmektedir. Ayrıca bağlayıcı olarak uçucu kül, yüksek cürufu ve silis dumanı kullanımı SSB'lerin işlenebilirliğini ve erken yaş dayanımını ciddi mertebede etkilediği araştırmacılar tarafından vurgulanmıştır. Yazarlara göre, SSB karışımlarında geleneksel betona kıyasla daha büyük tane çapına sahip agregalar kullanıldığından karışımların ayrışmaya karşı direncinin incelenmesi önem kazanmaktadır. Beton karışımların performansını artırmaya yönelik, geleneksel betonlarda kullanılan kimyasal katkıların, çelik veya polipropilen liflerin SSB'lerde de kullanılabilirliği bildirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Silindirle sıkıştırılmış beton, mineral katkı, kimyasal katkı, lif, taze ve sertleşmiş hal özellikleri”

Abstract

In recent years, roller compacted concrete (RCC) technology has been widely used around the world. As it is known that the RCC is preferred in dams and road constructions due to its low cost and rapid placement. RCC has the same basic components as normal concrete and manufactures using the same methods. However, unlike conventional concrete, a lower amount of cement is used as well as being compacted by a roller because of its dry consistency. In this study, general properties of RCC and type of cement used in RCC mixtures, properties of mineral admixtures such as fly ash, blast furnace slag and silica fume, aggregate dimensions and gradation, water, chemical admixtures and utilization effect of fiber on RCC mixtures were investigated. In addition, the advantages of these materials in RCC applications are mentioned. According to the studies examined, the heat of hydration of RCC mixtures decrease by using low amount of cement compared to conventional concrete mixtures. Besides, it was emphasized by researchers that fly ash, blast furnace slag and silica fume as binder significantly affect the workability and early age strength of RCCs. According to the authors, it is important to investigate the resistance to segregation of RCC mixtures because aggregates having a larger grain diameter are used than conventional concrete. In order to improve the performance of concrete mixtures, the chemical admixtures, steel or polypropylene fibers in conventional concrete was used in RCC mixtures as well.

Key Words

“Roller compacted concrete, mineral admixture, chemical admixture, fiber, fresh and hardened state properties”

1. Giriş

Toprak ve kaya dolgu elemanları ile serilen ve sıkıştırılan Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB), taze halde iken sıfır çökme değerine sahip olup, daha hızlı ve ekonomik şekilde inşa edilecek barajların tasarımları için yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilmiştir (ACI 207.5R-99, 1999). SSB, geleneksel betondan farklı olarak, aynı çimento dozajında ancak daha düşük su/çimento oranıyla yapılan kuru bir karışımdır (Zdiri ve ark., 2009). SSB'lerin normal betonlara göre hızlı üretim tekniği, dayanıklılığının iyi olması ve maliyetinin düşük olması gibi özelliklerinden dolayı dünyada yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca SSB üretiminde atık malzemelerin (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) yüksek oranda kullanılabilir olması SSB'lerin öne çıkmasında etkili olmuştur (Atiş, 2001).

SSB'lerin en yaygın ve en önemli kullanım alanları barajlar, yollar, hava limanları, fabrikalar ve petrol istasyonlarıdır. Söz konusu uygulamalarda beton dinamik yüklere ve çok ağır vasıtalarından kaynaklı yüklere maruz kalmaktadır (Delatte ve ark., 2003). SSB'ler aşırı basınç altında meydana gelen çatlak problemlerini çözmek ve çok sıcak havalarda uygulamalar için asfalt yollara bir alternatif olarak Qasrawi ve arkadaşları (2005) tarafından önerilmiştir. Ayrıca SSB'lerin erken yaşlarda yüksek dayanım göstermesinden, üretim maliyetlerinin düşük olmasından, hızlı yapım sürecinden ve daha az miktarda bağlayıcı madde içerdiğinden dolayı barajlar gibi kütle beton yapılarında da yaygın olarak tercih edilmektedir.

İnşaat sırasında maliyetin düşürülmesi ve inşa zamanının azalması bu uygulamanın temel avantajı olarak görülmektedir (ACI 207.5R-99, 1999). Diğer avantajları ise küçük inşaat ekipmanları, asfaltlama parkuru, el işi imalatı gerektirmemesi ve uzun süreli yükler altında sünme davranışının ihmal edilebilir olmasıdır (Ludwig ve ark., 1994). Dezavantajlarına bakıldığında SSB'de olası sınırlamalar ve zorluklar vardır. Uygulama sırasında yüzeylerde elmas taşlama uygulaması olmadığından, SSB'nin yapısı ve yüzey düzgünlüğü yüksek hız ve yoğun trafik altında hizmet verecek kaplamalar için uygun olmayabilir. Ayrıca bir transmiksör veya hazır karıştırıcı kamyonunda hazırlanmış SSB'nin miktarı karışımının kuru olmasından dolayı aynı araçlarda hazırlanan geleneksel betonun miktarından daha düşük olmaktadır (Topličić-Ćurčić ve ark., 2015).

Türkiye'de SSB yöntemi kullanılarak son yıllarda yapımı devam eden ve tamamlanmış bazı barajların genel bilgileri, baraj yapımından kullanılan SSB karışımlarının hacmi ve karışımlarda kullanılan bağlayıcı miktarları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye'de SSB kullanılarak yapımı devam eden ve tamamlanmış barajlar (Malcolm Dunstan and Associates, 2019)

Baraj	SSB Hacmi (m ³)	Çimento (kg/m ³)	Uçucu kül (kg/m ³)	Yükseklik (m)	Uzunluk (m)	Başlama	Bitiş
Kocaeli Karamürsel İhsaniye	130.000	75	45	69	203	2016	-
Narlı	49.000	65	50	47	153	2016	-
Beyhan II	191.000	130	0	60	363	2013	-
Yukarı Kaleköy	2.224.000	130	0	150	516	2012	2017
Aşağı Kaleköy	1.192.000	130	0	103	346	2013	2018
Melen	1.871.000	90	60	124	944	2013	2017
Köroğlu Kotanlı I	640.000	85	130	100	404	2015	2017
Kavşaktepe	330.000	81	39	71	268	2008	2017
Ardıl	108.000	75	50	54	246	2013	2017
Kotanlı II	245.000	85	130	70	250	2012	2015
Göktaş I	750.00	50	50	133	200	2011	2016
Ayvalı	1.650.000	50-100	110-120	177	405	2011	2015
Beyyurdu	186.000	95	0	78	176	2008	2015

Silindirle sıkıştırılmış betonların geleneksel betonlara göre en önemli farkı kıvamından ve içerdiği bağlayıcı miktarından kaynaklanmaktadır. Söz konusu kıvamın uygulanma esnasında silindirin batmadan geçeceği şekilde kuru olması gerekmektedir. Bu bağlamda, SSB'nin işlenebilirliği ve yoğunluğu en yüksek olacak şekilde malzeme seçimi ve tasarımı yapılmalıdır. SSB'nin özelliklerini etkileyen başlıca önemli parametreler;

- Sıkıştırma yüzdesi,
- Agreganın gradasyonu ve tipi,
- Çimentonun özellikleri,
- Mineral ve kimyasal katkıların özellikleri,
- Su muhtevası olarak ifade edilebilir (Hansen ve Reinhardt, 1991).

Genellikle SSB karışımında kullanılan malzemeler:

- Bağlayıcı maddeler
- Agregalar
- Su
- 200 No'lu elekten geçen çok ince malzemeler

- Lifler
- Akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici kimyasal katkıdır (Hansen ve Reinhardt, 1991).

Söz konusu bu malzemeler ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

1.1. Bağlayıcı Madde

SSB karışımında TS EN 197-1'e uygun herhangi bir çimento tipi kullanılabilmekte olup, geleneksel beton karışımlarında olduğu gibi çimento tipi seçiminde de SSB kaplamanın yapılacağı iklim ve yapım koşulları belirleyicidir. Genelde CEM I ve CEM II tipi çimentolar tercih edilebilmekte, ayrıca çimentoya ikame olarak beton santrallerinde mineral katkıları özellikle uçucu kül ve cüruf kullanılabilir. Mineral katkıların kullanımı betonun dayanıklılığını artırmakta ve özellikle uçucu kül kullanımı betonun işlenebilirliğini olumlu yönde etkilemektedir. Silindirle sıkıştırılmış betonlarda, çimento ve mineral katkıları, bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Kullanılan bağlayıcı malzemeler, betonun hidrasyon ısısını doğrudan etkilemekte ve özellikle erken yaş dayanımı üzerindeki etkisinin daha da belirgin olduğu bilinmektedir. Bu nedenle büyük kütle ve hacme sahip SSB'lerde hidrasyon ısısından kaynaklanan termal genleşmeler sonucunda oluşan çatlakları önlemek için çimentonun yerine %20 ila %30 oranında mineral katkı kullanılmaktadır (Hansen ve Reinhardt, 1991). Bağlayıcı maddelerin sülfat etkisi ve alkali-agrega reaksiyonu gibi etkilere karşı dayanıklı olması dikkate alınmaktadır (Andriolo, 1998).

1.1.1. Çimento

Normal betonlarda kullanılan çimento tipleri SSB'lerde de kullanılmaktadır. Baraj gibi yapılarda kütle beton dökümü sırasında oluşan hidrasyon ısısını azaltmak için düşük ısıli portland çimentosu seçilmektedir. SSB'lerde kullanılan düşük ısıli portland puzolan çimentosu ile yüksek fırın cürufu çimentosu dünyada da sık kullanılan çimento tiplerindedir. Söz konusu düşük ısıli portland çimentosunun kullanımı hidrasyon ısısından kaynaklanacak olan çatlakların oluşmasını engellemekte ve enine oluşan derzleri azaltmaktadır. Bu çimento tiplerinin ilk günlerdeki dayanımı normal portland çimentosuna göre daha düşük olmaktadır. Ancak, yapılan deneylerde ileri yaşlarda dayanımın daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir (Hansen ve Reinhardt, 1991). Çimento miktarının az ve puzolanik madde miktarının fazla olduğu barajlarda, açığa çıkan hidrasyon ısısının düşük olmasından dolayı normal portland çimentosu da kullanılmaktadır. Denizli Cindere Barajı'nda 50 kg/m³ CEMI 42.5R tipi çimento ve 20 kg/m³ uçucu kül, İzmir Beydağ Barajı'nda 60 kg/m³ CEMI 42.5R tipi çimento ve 30 kg/m³ uçucu kül kullanılmıştır (Andriolo ve Polat, 2006).

Japonya'da inşaa edilen SSB barajlarında genellikle 120 kg/m³ çimento kullanılmaktadır. Zemin yaklaşımıyla tasarlanan SSB'lerde çimento miktarı genellikle 120 kg/m³ olmaktadır (Hansen ve Reinhardt, 1991). Beton yaklaşımıyla tasarlanan SSB'lerde ise çimento miktarı 250 kg/m³'e kadar çıkabilmektedir. Hansen ve Reinhardt, 1991). Fransa'da bulunan Les Olivettes barajında yüksek fırın cürufu çimentosu kullanılmıştır (Andriolo, 1998). Beydağ Barajı'nda TS EN 197-1 "Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk" Kriterleri'ne uygun olan CEMI 42.5R çimentosu kullanılmış ve 7 günlük hidrasyon ısısı 75 kalori/gram veya daha düşük olma şartı getirilmiştir (Beydağ Barajı, 2006).

SSB'lerde düşük çimento dozajı kullanımının avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Hidrasyon ısısının düşük olması nedeniyle betonda çatlak oluşumu riskinin azalması,
- Çatlama riskinin azalmasından ötürü geçirgenliği daha düşük bir beton elde edilmesi,
- Betonun soğutma masraflarının azalması,
- Düşey derzlerin azalması,
- Ekonomik olması,
- Çimento kullanımından kaynaklanan durabilite problemlerinin azalması (Horzum, 2009).

1.1.2. Mineral Katkılar

Mineral katkıları, çoğunlukla silis veya silis-alümin kökenli malzemelerdir. Kendi başlarına çok az veya hiç bağlayıcı özelliği olmayan mineral katkıları, ancak çok ince bir şekilde öğütüldüğünde nemli ortamlarda ve normal sıcaklıkta kireç ile kimyasal reaksiyon yapıp bağlayıcılık özelliği kazanan inorganik maddelerdir.

1.1.2.1. Uçucu Kül

Dünyadaki ve Türkiye'deki SSB baraj inşasında daha çok yapay puzolan olarak uçucu kül kullanılmaktadır. Yapay puzolanlar arasında en çok tercih edileni uçucu küldür. Türkiye'de yapılan Beydağ Barajı'nda 30 kg/m³, Cindere Barajı'nda 20 kg/m³ ve Cine Adnan Menderes Barajı'nda ise 50 kg/m³ uçucu kül kullanılmıştır (Andriolo ve Polat, 2006). Uçucu kül, toz haline getirilmiş linyit veya taş kömürünü yakıt olarak kullanan termik santrallerinin bacalarındaki tozların elektrostatik filtrelerle tutulması ile elde edilen bir malzemedir. Uçucu kül 1938 yılında ilk defa Chicago'da bir yol yapımında çimentoya karıştırılarak kullanılmıştır. İkinci dünya savaşından sonra, yaşanan kaynak sorunundan dolayı bu malzemenin kullanımı gerek ABD'de, gerek Avrupa'da son derece yaygınlaşmıştır (Postacioğlu, 1986).

Uçucu kül, çimentonun hidrasyonu sonucunda oluşan kalsiyum hidroksit (CH) ve betonun boşluk çözeltilisindeki alkali hidroksitler ile reaksiyona girmektedir. Ayrıca, betonun durabilitesi için zararlı olan alkali-agrega reaksiyonunu önlemede uçucu külün koruyucu bir malzeme olduğu tespit edilmiştir. Uçucu külün bünyesinde bulunan camı yapıdaki silikatlar ile çimentodaki alkali hidroksitler arasındaki reaksiyonun, alkalileri tüketeceği veya miktarını çok azaltacağı bilinmektedir. Bu nedenle uçucu külün, reaktif silisli agregalar ile reaksiyona girecek olan alkalilerin miktarını azaltarak, alkali agregası reaksiyonunun neden olacağı betondaki genleşme ve çatlamaı önleyici veya azaltıcı katkısı olduğu bilinmektedir (Mindness ve ark., 2003).

Uçucu külün kullanımı, çökme değeri sıfır olan betonun işlenebilirliğini artırmakta ve kütle betondaki hidrasyon ısısının düşmesinde olumlu etkisi olmaktadır. Uçucu külün, özellikle SSB baraj uygulamalarında önemli olan prizi geciktirme özelliği de

bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda uçucu kül kullanımının, SSB'lerin mekanik ve durabilite özelliklerinin iyileşmesine katkıda bulunduğu görülmüştür. Uçucu kül, çimento hidrasyonu ile açığa çıkan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek boşlukları doldurur ve betonun geçirgenliğini azaltır (Mehta ve Monteiro, 1996). Ayrıca küçük boyutta uçucu kül taneleri reaksiyona girmeden de beton içindeki boşlukları fiziksel olarak doldurarak dolgu etkisi ile geçirimsizliğe katkıda bulunabilir. Sun ve ark. (1998) tarafından yapılan çalışmada farklı oranlarda uçucu kül kullanımının SSB'lerin yorulma dayanımları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada %0, 15, 30, 45 oranında uçucu kül içeren SSB karışımı ve normal beton (NB) olmak üzere 5 farklı seride karışım hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Beton numunelerinin karışım oranları (kg/m³) (Sun ve ark., 1998).

Seri	Çimento (kg)	Uçucu kül (kg)	Kimyasal katkı (kg)	Kum (kg)	İri agrega (kg)	Su (kg)
F0	300	0	1.5	802	1309	114
F15	270	45	1.575	752	1332	113
F30	240	90	1.65	699	1348	113
F45	210	130	1.725	650	1373	113
NB	330	0	0.825	638	1344	142

Elde edilen sonuçlara göre SSB numunelerinde uçucu kül kullanımının betonların 28 ve 90 günlük eğilme ve yorulma dayanımlarını artırdığı gözlenmiştir. Uçucu kül içeren ve içermeyen SSB'lerin yorulma dayanımı normal betona göre %40-50 kadar artmıştır. Yapılan diğer bir çalışmada hem basınç dayanımları hem de eğilme dayanımları açısından en yüksek sonuçları %45 oranında uçucu kül katkılı SSB'lerin verdiği görülmüştür (Cao ve ark., 2000).

SSB karışımında uçucu kül kullanımının amaçları aşağıda sıralanmıştır:

- Betonun hidrasyon ısısını en aza düşürmek, enine derzleri azaltmak,
- Betonun işlenebilirliğini arttırmak,
- Betonun su geçirimsizliğini azaltmak,
- Betonun ileri yaş dayanımını daha yüksek değerlere çıkarmak,
- Dolgu malzemesi olarak boşluk oranını düşürmek,
- Çimento dozajını azaltarak beton maliyetini düşürmektir (Andriolo, 1998; Hansen and Reinhardt, 1991).

Uçucu külün özgül ağırlığı çimentoya göre daha düşük olduğundan çimento yerine aynı ağırlıkta uçucu kül ikame edildiğinde, hacim artacağından, beton daha plastik ve kohesif hale gelebilmekte ve işlenebilirliği artabilmektedir.

1.1.2.2. Yüksek fırın cürufu (YFC)

Demir üretiminde kullanılan yüksek fırında, cevherden demir alındıktan sonra geri kalan maddeye cüruf denilmektedir. İçinde alümin, silis ve kireç bulunan cürufun yoğunluğu 2.85 ile 2.95 arasında değişmektedir. Söz konusu yüksek fırın cürufunun kaynağı ve inceliği, taze ve sertleşmiş SSB'nin özelliklerini etkilemektedir.

Yüksek fırın cürufu, sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit gibi aktivatörler kullanılarak, ya da ince öğütülerek ve Portland çimentosunun hidrasyonu ile ortaya çıkan Ca(OH)₂'i kullanmak suretiyle, hidrolik özelliğe sahip olur. Aktivasyon sonunda kalsiyum silikat hidratlar meydana gelir (Tokyay ve Erdoğan, 2001; Özkan 2006).

Yapılan bir çalışmada YFC'nin erken yaşlarda daha yavaş puzolanik reaksiyon göstermesine bağlı olarak, çimentonun yerine kısmen YFC kullanılması 3 günlük dayanım değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Ancak ileri yaşlarda YFC içeren karışımlar, kontrol karışımına kıyasla, daha yüksek dayanım performansı göstermiştir (Rao ve ark., 2016).

Saluja ve arkadaşları (2019) çalışmalarında agrega tipindeki değişim ve yüksek fırın cürufunun SSB karışımlarının kuruma büzülme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan deney sonuçlarına göre SSB karışımında bulunan çimento ve su miktarının geleneksel betona kıyasla daha az olmasından dolayı, SSB karışımlarından yaklaşık %50 daha az kuruma-büzülme tespit edilmiştir. Ancak SSB karışımlarında YFC ile çimentonun ikame oranının artmasıyla kuruma büzülme artmıştır.

Rao ve arkadaşlarının (2015) yaptığı diğer bir çalışmada SSB karışımlarda iki farklı mineral katkının (uçucu kül ve yüksek fırın cürufu) puzolanik etkisi, spesifik dayanım oranı, spesifik dayanım indeksi ve puzolanik etkinin dayanıma katkısı gibi çeşitli dayanım indeksleri ile incelenmiştir. Karışımlardaki çimento ağırlıkça %10, %20, %30, %40, %50 ve %60 oranlarında uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile ikame edilmiştir. Deney sonuçlarına göre erken yaşlarda, uçucu kül içeren SSB betonların dayanımı karışımdaki uçucu kül oranının artmasıyla azalmıştır. Ancak cüruf içeren SSB'lerde ise karışımlardaki cüruf oranının artmasıyla dayanımlarda artış gözlenmiştir. 90 günlük kürlenme süresinin sonunda ise SSB karışımlarındaki uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun dayanıma etkisi yaklaşık %50-60 oranlarında olmuştur.

1.1.2.3. Silis dumanı

Silikon metalin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın, hızlı soğutulmuş yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen ve %85 ile %98 arasında amorf yapıya sahip silis içeren çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye silis dumanı adı verilmektedir (Erdoğan, 2003).

Endüstriyel bir atık olan silis dumanının betona ilave edilmesiyle daha yüksek performanslı betonlar elde edilebilmektedir. Silis dumanını oluşturan bileşiklerin arasında SiO_2 'nin %85'ten fazla bulunmasından dolayı silis dumanı kendi başına bağlayıcılık özelliği olmamasına rağmen çok iyi bir yapay puzolandır. Silis dumanı taneleri çimento tanelerinin yaklaşık 100 katı daha küçüktür. Silis dumanının puzolanik reaksiyonu sonucunda oluşan ürünler, betonun mikro yapısında doluluk sağlamak ve geçirimsizliğini artırmaktadır. Ancak, olumsuz bir özellik olarak, silis dumanının betonda plastik rötreği artırdığı bilinmektedir (Erdoğan, 2003).

Avrupa'da yaygın olarak kullanılmasına rağmen, cüruf ve silis dumanı gibi bağlayıcı malzemeler batı Kanada ya da Amerika Birleşik Devletleri'nde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, Silis dumanı Kanada'nın doğusunda son 10 yılda yüksek performanslı SSB kaplamaların yapımında kullanılmaktadır (Pigeon ve ark., 1998). Silika dumanı, yalnızca SSB karışımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda numunelerin dayanım gelişimini de hızlandırmaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda, SSB karışımlarda silis dumanı kullanımının donma-çözülmeye karşı dayanıklılığını artırdığı belirtilmiştir (Marchand ve ark., 1992; Reid ve ark., 2000).

Kiran ve ark (2015) yaptıkları çalışmada, silis dumanı içeren SSB karışımlarının basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı özellikleri üzerine deneysel araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Silis dumanı içeren SSB karışımlarında, çimento ağırlıkça %5, %7,5 ve %10 oranlarında silis dumanı ile yer değiştiriliyor. Söz konusu karışımlar üretildikten sonra taze halde işlenebilirliği ve sertleşmiş halde dayanım özelliklerini belirlemek için testler yapılmıştır. Sıkıştırma faktörü testi, vebe testi ve çökme testi gibi işlenebilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. SSB karışımlarda silis dumanının bulunması 3,7 ve 28 günlük basınç, yarmada-çekme ve eğilme dayanımlarını belirlemiştir. Deney sonuçlarına göre karışımlarda silis dumanı ikamesi arttıkça dayanımlarda da önemli mertebelerde artış gözlenmiştir. Ancak karışımın işlenebilirliği silis dumanının artışıyla olumsuz etkilenmiştir.

Yapılan bir diğer çalışmada silis dumanı ve pomza kullanımının, SSB karışımlarının işlenebilirliği, basınç dayanımı ve dona karşı direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, yüksek miktardaki bağlayıcı malzeme içeren karışımların dona karşı dirençleri daha yüksek çıkmıştır. Karışımlara %10 oranında silis dumanının eklenmesi, SSB karışımlarının hem basınç dayanımını hem de dona karşı direncini artırmıştır. Ancak, taze halde karışımların işlenebilirliğini önemli ölçüde azaltmıştır. Karışımlarda pomzanın eklenmesi işlenebilirliği artırırken, basınç dayanımı ve dona karşı direnci azaltmıştır (Vahedifard, 2010).

1.2. Agrega

Silindire sıkıştırılmış betonlarda aynı geleneksel betonda olduğu gibi ince ve iri agrega kullanılmaktadır. SSB'lerde kullanılan agrega hacimsel olarak %85'den fazla olduğu için agrega özelliği SSB özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu özellikler agreganın basınç, çekme ve kesme dayanımı, elastik özellikleri, termal özellikleri ve dayanıklılığıdır. Bu yüzden daha yoğun, dayanımı yüksek ve üniform bir SSB elde etmek için daha kaliteli ve uygun gradasyonda agrega seçimi yapılması gerekmektedir (Andriolo, 1989). Kırma ve doğal agrega SSB üretiminde kullanılabilir. Betonun harç ihtiyacını agrega boşluk hacmi ve tane şekli belirlemektedir. SSB'de en büyük tane boyutu, 200 nolu elekten geçen miktar ve kum içeriği gibi özellikler geleneksel betondakine göre bazı farklılıklar göstermektedir. SSB betonlarında agreganın tane şeklinin dayanıma etkisi klasik betonlara göre daha azdır. Bu olay karıştırma, taşıma ve sıkıştırma ekipmanlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Alkali-agrega reaksiyonu oluşum potansiyeli SSB'de klasik betonlara göre daha azdır. Bunun nedeni ise SSB'nin düşük çimento ve su içeriğidir (Ağralıoğlu, 2005). Yapılan çalışmalarda yıkanmamış agrega, SSB yapımında başarıyla kullanılmıştır (Hansen and Reinhardt, 1991). Ayrıca SSB'lerde geri kazanılmış agregaların kullanılabilirliği araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir (Debieb ve ark., 2009).

Benzer bir çalışmada, SSB'lerde geri kazanılmış agregaların kullanılabilirliği Courard ve ark. (2010) tarafından araştırılmıştır. Bu amaçla maksimum agrega tane çapı 20 mm ve çimento dozajı 250 kg/m^3 olan SSB numuneleri hazırlanmıştır. Tablo 3'de geri dönüştürülmüş ve doğal agrega ile tasarlanan SSB'nin karışım oranları verilmiştir.

Tablo 3. Karışım oranları (Courard ve ark., 2010).

Karışım tasarımı	SSB (geri dönüştürülmüş agrega)	SSB (Doğal)
Çimento (kg)	250	250
Kum (kg)	735	735
2/20 geri dönüştürülmüş agrega (kg)	1190	0
7/14 kireçtaşı agregası (kg)	0	810
14/20 kireç taşı agregası (kg)	0	420
Su (kg)	95.5	95.5

Hazırlanan numuneler üzerinde 7 ve 28 günlük basınç, donma çözülme ve porozite deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre doğal ve geri kazanılmış betondan elde edilen agregaların kullanıldığı SSB'nin sıkıştırılabilirlik açısından normal SSB'ye benzer olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, doğal agrega kullanılan SSB karışımlarının basınç dayanımı daha yüksek olmuştur.

1.2.1. İri Agrega

SSB'de kullanılan en büyük agrega tane boyutu genellikle 76 mm'dir. Bundan daha büyük tane çaplı agregalar büyük ayrışma problemi yaratacağından, ayrıca daha büyük üretim, taşıma ve serme ekipmanları gerektireceğinden dolayı ekonomik

olmamaktadır. Terbela Barajı'nda kullanılan agreganın en büyük tane boyutu 220 mm'dir. Japonya'da yapılan silindir ile sıkıştırılmış barajların çoğunda, en büyük agrega tane boyutu 150 mm olup çok sıkı döküm kuralları ve derz iyileştirme yöntemleri ile birlikte uygulanmıştır (Andriolo, 1998).

Agrega boyutları SSB'nin sıkışabilme özelliğini etkilemektedir. SSB katmanlarının serilme yüksekliğinin en büyük tane boyutunun en az 3 katı olması gerekmektedir (Hansen ve Reinhardt, 1991). Büyük tane çaplı betonlarda daha büyük sıkıştırma kuvveti gerekir. 38 mm'den daha büyük tane çaplı SSB'lerde ayrışma ihtimali yüksektir. Ayrışmayı önlemek amacıyla üretim, taşıma ve serme ekipmanlarının doğru seçilmesi gerekmektedir. En büyük tane boyutu seçiminde; yeterli dayanım, bağlanma ve geçirimsizliği sağlamak üzere ayrışmayı da önleme maliyeti göz önüne alınmalıdır (U.S. Department of the Interior BR, 1987).

Geleneksel betonda olduğu gibi en büyük tane boyutu arttıkça agrega boşluk oranı azalır ve böylece harç miktarı da azalmış olur. Harç ihtiyacının azalmasından dolayı baraj gibi büyük kütleli SSB'lerde hidrasyon ısısından doğabilecek termal çatlakların önüne geçilmiş olacak ve maliyetlerde azalma görülecektir. Ayrıca agrega üretim maliyeti de azalmış olacaktır (U.S. Department of the Interior BR, 1987).

1.2.2. İnce Agregası

İnce agrega gradasyonu SSB'nin harç miktarını belirler. İnce agreganın gradasyonu, tipi, kalitesi; SSB'nin sıkıştırılması için gerekli enerjiyi ve ayrıca optimum sıkıştırmayı elde edebilmek için silindirlerin geçiş sayısını etkiler. Buna ilaveten, agregalar arasındaki boşlukları dolduracak ve agrega çevresini saracak hamur içeriğini de belirler. Beton yaklaşımıyla tasarlanan SSB'lerde kum miktarı genellikle toplam agreganın yüzde 30 ile 50'si arasında olmaktadır (Hansen ve Reinhardt, 1991). Zemin yaklaşımıyla tasarlanan SSB'lerde ise kum oranı toplam agreganın %40-55 arasında olabilir. Beydağ Barajı'nda ince agrega oranı toplam agreganın %50'si kadardır. İnce agrega oranı %50 civarında tutularak beton daha kohezif hale getirilip ayrışma oluşma potansiyelini azaltılmaktadır (Andriolo ve Polat, 2006).

1.2.3. Çok İnce (200 No'lu Elekten Geçen) Malzeme

SSB'nin sıkıştırılabilirliğini ve harç içeriğini; içindeki çok ince malzeme miktarı etkilemektedir. SSB içindeki boşlukları doldurduğu için çok ince malzeme oranı arttıkça bağlayıcı ve su miktarı azalmaktadır. Plastik olmayandan düşük plastisiteli seviyeye kadar olan ince malzeme, SSB imalatında başarıyla kullanılmıştır. Plastisite indisi 4 veya daha az olan ince malzemeler inşaat esnasında problem oluşturmamaktadır. Plastisite indisi 5 ile 7 arasında olan ince malzemeler, laboratuvar deneyleri ile yeterince araştırılıp, topaklanma yaratmadığı ve işlenebilirliği düşürmediği takdirde karışımda kullanılabilir. Ancak, plastisite indisi 7'den fazla olan ince malzemenin SSB'de kullanılması istenmemektedir (U.S. Department of the Interior BR, 1987).

Kil toprakları olarak, kil, silt ve normal karıştırma işlemi ile parçalanamayan kum topaklaşmaları kast edilmektedir. Yüksek oranda kil topağı içeren SSB karışımları, yapının zayıflamasına neden olur. Karışım esnasında çimento, kil topraklarının arasına işlemekle birlikte toprak yüzeyini sarar. Buna ilave olarak yüksek oranda kil toprakları, SSB karışımı için gerekli ince malzemeyi azaltır ve karışım oranlarını değiştirir. Agregası ocak tayini esnasında, tabii rutubetteki agreganın 4.76 mm elekten elenerek muhtemel kil topağı oranı tespit edilmelidir (U.S. Department of the Interior BR, 1987). %10 veya daha fazla oranda kil topağı içeriği (ıslak kütle olarak) inşaat esnasında sıkıntı yaratabilir.

Kilim yüksek orandaki su emme kabiliyeti SSB'nin büzülmesine neden olmakta, çatlama riskini arttırmakta ve dolayısıyla basınç dayanımını düşürmektedir. Agreganın su emme kapasitesi, su içeriği, plastisitesi ve toplam ince madde oranındaki değişiklik, karışımın su ihtiyacını, dolayısıyla, sıkıştırılabilirliğini etkiler. Bu da tabakalar arasında kalacak boşluk miktarını ve dayanımını etkilemektedir (Hansen and Reinhardt, 1991).

Yüksek oranda çok ince malzeme içeren karışımlar; karışım esnasında veya doğal olarak kil veya silt toprakları oluşturma eğilimi taşır. SSB karışımında bu tür topraklar yapışmada ve dayanımda zayıflatıcı rol oynamalarında, kabarmalar, düşük dayanıklılık, karıştırmada ve işlemede görülen olumsuzluklar nedeni ile arzu edilmez. Aşırı ince taneler, yüksek oranda su emme özellikleri ile taşıma esnasında taze SSB' de işlenebilirliğini düşürür ve sertleşmiş betonda da donma-çözülme direncini azaltır. Agregası yığını içinde kümeleşen bu topraklar karışım esnasında dağılarak SSB'nin su ihtiyacını arttırabilirler (U.S. Department of the Interior BR, 1987). Genel olarak, 200 nolu elekten geçen malzeme agregalar arasındaki boşlukları dolduracak miktarda olması ve plastisite indisinin 5'ten küçük olması gerekmektedir.

Birçok baraj inşaatında yıkanmamış agrega kullanılmıştır. Düşük dozajlı SSB barajlarında 200 Nolu elekten geçen miktar toplam agrega kütlelerinin %8-10'u kadardır. Optimum miktarı bulabilmek için deneysel çalışmanın yapılması gerekmektedir. İnce malzeme bu oranlarda olması (Hansen and Reinhardt, 1991):

- SSB'nin işlenebilirliğini artırır
- SSB'nin sıkıştırılabilirliğini artırır
- Agregalar arasındaki boşlukları doldurarak SSB'nin dayanımını artırır
- Betonun geçirimsizliğini artırır
- Boşlukları doldurarak SSB'nin su ihtiyacını azaltır
- SSB'nin kohezyonunu arttırarak ayrışmayı azaltır

Beydağ Barajı hazırlık çalışmalarında mevcut dere agregasında yapılan çalışmalarda 200 no'lu elekten geçen miktar %3,5 ile %5 arasında olduğu tespit edilmiştir. 200 No'lu elekten geçen miktarın azlığı sebebiyle daha yüksek oranda puzolanik madde kullanılmıştır. Böylece dere agregası yıkanmadan doğrudan SSB'de kullanılabilmiştir (Andriolo vd., 2006).

1.2.4. Agregası Tane Dağılımı

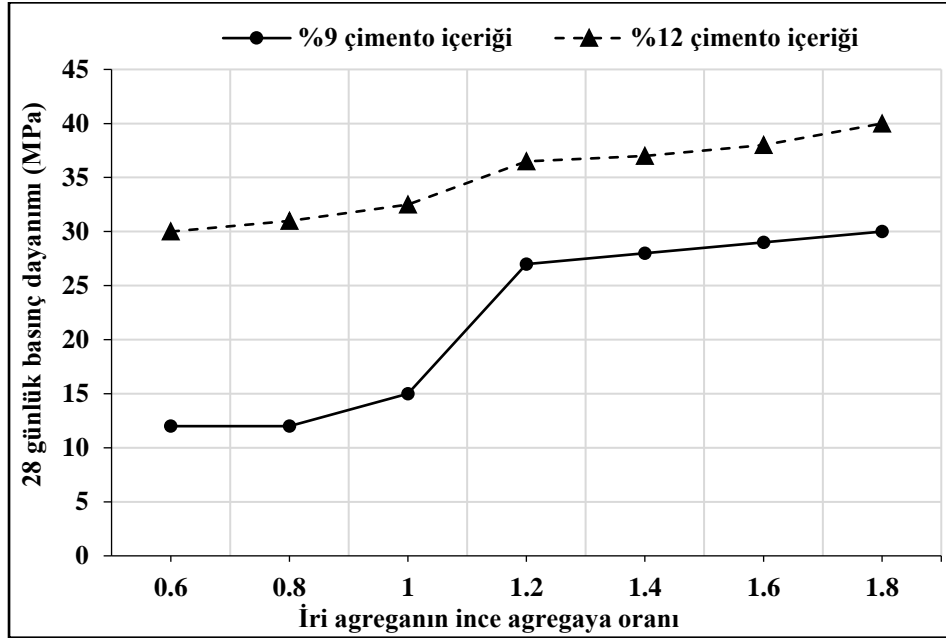
SSB'de kullanılan agreganın tane dağılımı geleneksel betonda olduğu gibi hassas bir şekilde olmakla birlikte, hiçbir sınıflandırma bulunmadan da kullanılabilir. İnce ve iri agreganın tane dağılımı ve karışım oranları SSB özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Agregası tane dağılımı ve oranları iki yaklaşımda farklı özellikler göstermektedir. Bunun başlıca sebepleri; en büyük tane boyutu, ince agrega/200 nolu elekten geçen malzeme oranı ve sınıf sayısı gibi özelliklerinin farklı oluşlarıdır (Andriolo, 1998). İri agreganın

ince agregaya oranının (C/F) SSB'nin taze ve sertleşmiş hal özelliklerine etkisi Hashemi ve ark. (2018) tarafından incelenmiştir. Karışımlar %9 (204 kg/m³) ve %12 (268 kg/m³) çimento içeriği ile üretilmiştir. Tablo 4'te karışım oranları verilmiştir.

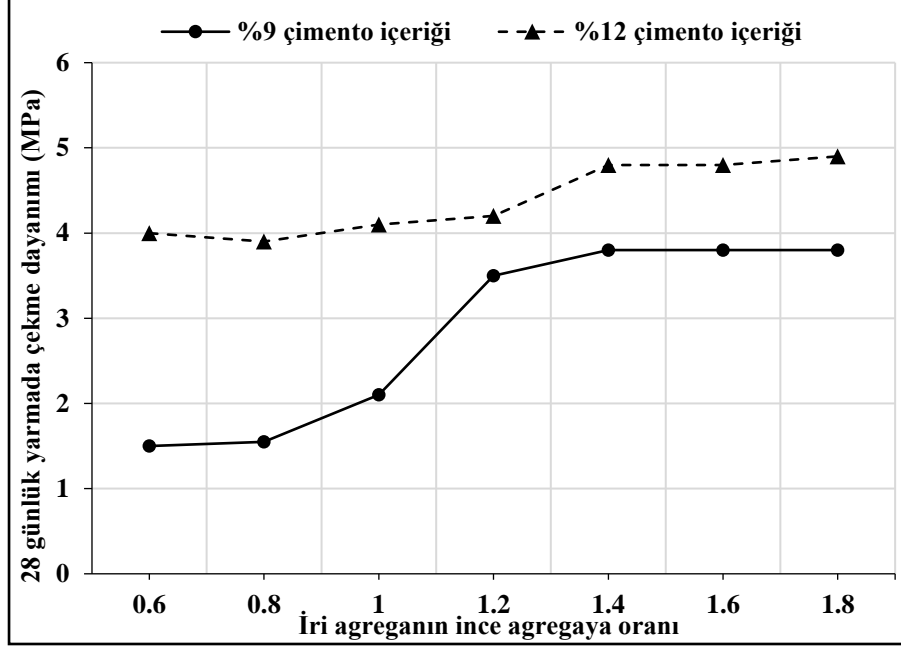
Tablo 4. Karışım oranları ve Vebe zamanı (Hashemi ve ark., 2018).

Karışımlar	Çimento (%)	Çimento (kg/m ³)	Su/çimento	İri agregaya	İnce agregaya	İri agregaya/ince agregaya	Su	Vebe zamanı (s)
A-9-1				773	1288	0.6	85.6	
A-9-2				916	1145	0.8	85.6	10–20
A-9-3				1030	1030	1	85.6	
A-9-4	9	204	0.42	1123	937	1.2	85.6	20–30
A-9-5				1202	859	1.4	85.6	
A-9-6				1268	793	1.6	85.6	30–38
A-9-7				1325	736	1.8	85.6	
B-12-1				738	1230	0.6	112.8	
B-12-2				875	1094	0.8	112.8	10–18
B-12-3				984	984	1	112.8	
B-12-4	12	268	0.42	1074	895	1.2	112.8	18–26
B-12-5				1148	820	1.4	112.8	
B-12-6				1211.5	757	1.6	112.8	26–34
B-12-7				1266	703	1.8	112.8	

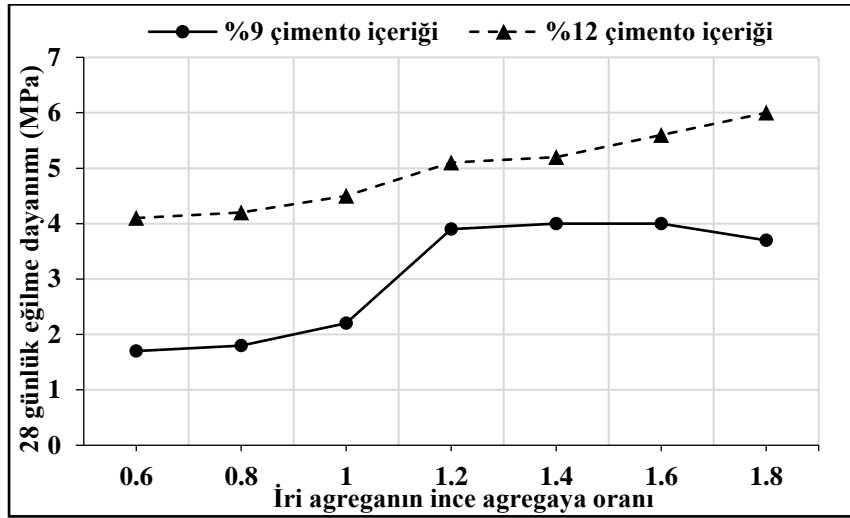
Araştırmada Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, Vebe zamanı ve porozite deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı sonuçları Şekil 1- 3.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. İri agreganın ince agregaya oranı ve 28 günlük basınç dayanımı ilişkisi (Hashemi ve ark., 2018).



Şekil 2. İri agreganın ince agregaya oranı ve 28 günlük yarmada çekme dayanımı ilişkisi (Hashemi ve ark., 2018).



Şekil 3. İri agreganın ince agregaya oranı ve 28 günlük eğilme dayanımı ilişkisi (Hashemi ve ark., 2018).

Sonuçta, iri agreganın ince agregaya oranı 0,6'dan 1,8'e yükseldiğinde Vebe zamanı 3 kat artmıştır. Vebe zamanı çimento içeriği %9'dan %12'ye yükseldiğinde %12 mertebesinde bir azalma göstermiştir. C/F oranının 0,6'dan 1,2'ye yükseldiğinde porozite önemli ölçüde azalmaktadır. Bu azalma %9 çimento içeren karışımda %60 olurken, %12 çimento içeriğindeki karışımda %38 olduğu görülmüştür.

Beton yaklaşımıyla tasarlanan SSB'lerde agrega tane dağılımı geleneksel betonla benzer özellikler taşımaktadır. Genellikle kullanılan en büyük tane boyutu 75 mm olmakla beraber Tamagawa Barajı'nda 150 mm, Upper Stillwater Barajı'nda 50 mm, Beydağ Barajı'nda 50 mm boyutunda agrega kullanılmıştır (Andriolo, 1998).

En büyük tane boyutu 75 mm olarak tasarlanan SSB'lerde agrega, genellikle 4 sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflar 0 mm - 4.75 mm, 4.75 mm - 19 mm, 19mm -38 mm, 38 mm-75 mm'dir (Andriolo, 1998).

Özellikle ince agreganın şekli ve tane dağılımı SSB'nin işlenebilirliğini ve yoğunluğunu etkileyen en önemli özelliklerinden birisidir. Bu özellikler ayrıca, SSB'nin dayanımını ve geçirimsizliğini etkilemektedir. SSB'nin işlenebilirliği; üretim, taşıma ve serme ekipmanlarının seçimini de etkilemektedir. SSB'de oluşabilecek ayrışmayı önlemek amacıyla, en büyük tane boyutunu daha düşük seçmek ve ince malzeme oranını arttırmak gerekmektedir.

Zemin yaklaşımı ile tasarlanan SSB'lerde ayrışma oluşma potansiyeli yüksek olduğundan dolayı en büyük tane boyutu genellikle 50 mm olarak seçilmektedir. 200 nolu elekten geçen miktar %0-%15 arasında değişmektedir. Bu nedenle, birçok durumda agregalar yıkanmadan kullanılabilir (Hansen ve Reinhardt, 1991).

1.3. Su

Normal beton yapımında kullanılan su, SSB yapımında da kullanılabilir. Karışım suyunun içilebilir nitelikte olması ve içinde yağ, asit, tuz, alkali, organik madde ve diğer zararlı maddelerin bulunmaması gerekmektedir. Karışımlarda kullanılacak karma suyunun

miktarı kullanılan agreganın sekli ve inceliğine, bağlayıcı tipi ve miktarına bağlıdır (Ağırlioğlu, 2005). En büyük tane boyutu 50 mm olan SSB karışımlarının su miktarı 90-160 kg arasında değişmektedir. Yüksek miktardaki mineral katkı ve 200 nolu elek altı malzeme su ihtiyacını artırır (Andriolo, 1998).

1.4. Kimyasal Katkılar

Normal betonda kullanılan katkı SSB’de de kullanılabilir. Daha az su içeriğine ve daha az karıştırma süresine sahip olduğundan, kimyasal katkıların SSB üzerindeki etkisi daha azdır. SSB’de kullanılan katkı ASTM C494 “Standart Spesification for Chemical Admixtures for Concrete” kriterlerini sağlamalıdır (PCA, 2006). Kimyasal katkı maddeleri SSB’nin işlenebilirliğini arttırmak ve priz süresini geciktirmek amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle sıcak havalarda kimyasal katkı kullanılarak SSB’de oluşabilecek soğuk derzlerin önüne geçilir. SSB karışımlarında kullanılan kimyasal katkıları şunlardır:

- Su azaltıcı katkı: Bu katkı kuru kıvamdaki SSB’nin su miktarını değiştirmeden veya azaltarak işlenebilirliğini artırır. Ayrıca bu katkı su miktarını azaltacağı için daha ekonomik SSB elde edilebilir. Daha önceden yapılan çalışmalar, su azaltıcı katkı dozajının normal betona kıyasla üretici firmanın önerdiği minimum dozajın genellikle 4 katı olduğunu göstermiştir (Gauthier and Marchand, 2005).
- Priz geciktiriciler: SSB’nin daha uzun süre işlenebilir halde tutulabilmesi için kullanılmaktadır. Özellikle baraj inşaatlarında üzerine gelecek diğer SSB tabakasıyla daha iyi bir kaynaşma sağlar.
- Hava sürükleyici katkı: Donma-çözünme etkisinin görüldüğü soğuk iklimli yerlerde SSB’yi korumak amacıyla kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda SSB’de kullanılan hava sürükleyici katkı miktarı normal betonlara göre daha yüksek olmaktadır (USACE, 2000).
- Piggott (1999), SSB’nin kabul edilebilir limitlerdeki donma-çözülme karşı dayanıklılığının hava sürükleyici katkı kullanmadan da elde edilebildiğini, bu yüzden bu katkıların SSB’lerde yaygın olarak kullanılmadığını belirtmiştir. Ayrıca SSB karışımlarına hava sürükleme işlemi zor olmaktadır (PCA, 2006).

1.5. Lifler

RCC’nin en önemli ve yaygın kullanım alanları, fabrikalar, benzin istasyonları, havaalanları ve yollar gibi dinamik yüklere maruz kalan veya ağır taşıtların geçtiği yerlerdir (Delatte, 2003). Bundan dolayı araştırmacılar tarafından geleneksel betonlarda olduğu gibi SSB’lerin de mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmek için farklı tipte lifler kullanılmıştır. Yapılan bir çalışmada SSB karışımlarına polipropilen (PP) lif ilave edilmesinin karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Metreküp 1 kg PP lif içeren karışımın lif içermeyen karışımlara kıyasla çekme dayanımının yaklaşık %23 mertebesinde arttığı görülmüştür. PP liflerin SSB’de kullanılmasının dayanım açısından tatmin edici sonuçlar verdiğini bulunmuştur (Benouadah ve ark., 2017). Neocleous ve arkadaşları (2011), SSB’lerin statik yükler altındaki eğilme davranışının, çelik liflerin eklenmesiyle artırılacağına göstermiştir.

Lin ve Karadelis (2013) tarafından yapılan çalışmada çelik lif ve polivinil alkol (PVA) lif kullanımının SSB’lerin eğilme dayanımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda çelik lif kullanım oranı hacimce %1, 1,5 ve 2 olarak, PVA oranı ise %1,5 olarak belirlenmiştir. Üretilen SSB numuneleri üzerinde 28 günlük basınç ve eğilme testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre lif kullanımının SSB’lerin basınç ve eğilme dayanımlarını arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca polimer lifle güçlendirilmiş çelik lifli SSB’lerin eğilme dayanımlarının, polimer lifle güçlendirilmemiş çelik lifli SSB’lerin eğilme dayanımlarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Zhang ve arkadaşlarının (2018) çalışmalarında, kauçuk parçacıkları ve çelik lif içeren SSB karışımlarının ağırlıkça %25 potasyum asetatın bulunduğu ortamda numunelerin donma-çözülme karşı direnci araştırılmıştır. Söz konusu numunelerin kütle kaybı ve bağıl dinamik elastik modülü tespit edilmiştir. Ayrıca, mikro yapı ve boşluk yapıları incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre tüm SSB karışımlarında donma-çözülme çevrimlerinin artmasıyla kütle kaybı artmıştır. Karışımlara kauçuk parçacıkların veya çelik liflerin eklenmesi, donma-çözülme çevrimlerindeki kütle kaybı üzerinde önemli bir etki göstermemiştir. Ancak çelik lif ile kauçuk parçacıklarının birlikte kullanılması SSB karışımlarının donma-çözülme altındaki performansını düşürmüştür. Donma-çözülme çevrimlerinin artmasıyla SSB’lerin dinamik elastisite modülleri olumsuz etkilenmiştir. Mikro yapı incelemelerine göre karışımdaki kauçuk parçacıkları ve çelik lifleri, donma-çözünme çevrimlerinin sebep olduğu çatlakları etkili bir şekilde engelleyememiş ve numunelerin porozitesinde artış gözlenmiştir.

SSB kaplama uygulamalarında kullanılan uygun kıvam ve mekanik performansa sahip makro-sentetik lif içeren SSB tasarımı ile ilgili Rooholamini ve arkadaşları (2018) araştırmalar yapmışlardır. SSB karışımlarında kullanılan sentetik lif, çimento (300–350 kg/m³) ve suyun (120-150 kg/m³) Vebe zamanı, basınç ve eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla yüzey metodoloji uygulayarak çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu üç faktör arasındaki etkileşim, SSB karışımına makro-sentetik liflerin eklenmesinin SSB kıvamını (Vebe zamanı) doğrusal olarak olumsuz etkilediği, ancak liflerin basınç dayanımını önemli ölçüde etkilemediğini gösteren istatistiksel bir regresyon modeli kullanılarak tespit edilmiştir. Üç noktalı eğilme deneyi sonuçları, makro-sentetik lifin, SSB’nin eğilme dayanımını arttırmada ve yüksek eğilme dayanımlı SSB’de çatlama sonrası eğrinin sertleşmesini sağlamada çok önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

2. Sonuçlar

Bu çalışmada, SSB ile ilgili çok sayıda araştırmadan faydalanılmıştır. Bu amaçla, SSB kullanımının çeşitli avantajlarından bahsedilirken, kullanılan malzemelerin özellikleri ve literatürde bunlarla ilgili yapılan çalışmalar açıklanmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- SSB imalatında geleneksel beton üretimiyle aynı yöntemler kullanıldığından uygulamada yeni bilgi ve tecrübe olmaksızın üretim gerçekleştirilebilir.
- Geleneksel betonla kıyaslandığında daha düşük miktarda bağlayıcı kullanılması nedeniyle ekonomiktir.
- Düşük çimento miktarı nedeniyle düşük hidrasyon ısı ortaya çıkacağından, özellikle baraj gibi kütle betonlarda karşılaşılan en büyük problemlerden biri olan çatlak sorununun önüne geçilmiş olur.
- SSB karışımlarına uçucu kül ilave edilmesinin, SSB'nin taze halde işlenebilirliğini, sertleşmiş betonda ileri yaş dayanımını ve durabilite özelliklerini olumlu etkilediği görülmüştür.
- SSB karışımlarda bağlayıcı olarak çimento ile birlikte yüksek fırın cürufu kullanılması SSB'lerin 3 günlük dayanımlarını az da olsa olumsuz etkilerken, sadece çimento içeren karışımlara göre SSB'lerin ileri yaş dayanımlarının yüksek olduğu bildirilmiştir. Ayrıca SSB karışımlarında yüksek fırın cürufunun çimento ile ikame oranının artmasıyla karışımların kuruma büzülme davranışının olumsuz etkilendiği vurgulanmıştır. Bu bağlamda yüksek fırın cürufu kullanılan SSB'lerde kuruma büzülme performansı bakımından önlemlerin alınması gerektiği beyan edilmiştir.
- SSB'lerde silis dumanının kullanılması karışımların dayanım, geçirgenlik, rötre ve donma-çözölmeye karşı performansını artırırken, taze halde işlenebilirlik performansını olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir.
- SSB karışımlarındaki agrega miktarı, geleneksel betonlara kıyasla hacimsel olarak daha fazla olmasından dolayı agrega özelliklerinin SSB'lerin taze ve sertleşmiş hal özelliklerini doğrudan etkilemediği söylenmiştir. SSB karışımların üretiminde doğal ve kırma kireçtaşının tercih edildiği rapor edilmiştir. SSB'lerde çimento dozajının düşük olmasına bağlı olarak harc fazının azalmasıyla alkali-agrega reaksiyonunun ve termal çatlakların oluşma riskinin geleneksel betona kıyasla daha düşük olduğu vurgulanmıştır.
- SSB karışımlarda işlenebilirliği sağlamak, katmanlar arasında oluşan soğuk derzi azaltmak ve donma-çözölme etkileri gibi betona zarar verebilecek çevresel faktörleri en aza indirebilmek için akışkanlaştırıcı, priz geciktirici ve hava sürükleyici kimyasal katkıların kullanıldığı rapor edilmiştir.
- Geleneksel beton karışımlarına benzer olarak SSB'lerinde mekanik ve durabilite performanslarını artırmak amacıyla polipropilen ve çelik lif kullanımını önerilmiştir. Söz konusu liflerin SSB'lerin basınç ve eğilme dayanımları üzerine olumlu bir etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma TUBİTAK 1001 - Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı (Proje numarası: 217M408) ve AYP(MH)-2016/16 nolu Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Altyapı Projesi kapsamında desteklenmiştir.

Referanslar

- ACI 207 5R-99, (1999). Roller-compacted Mass Concrete. ACI Manual of Concrete Practice. Part 1, USA 47p.
- Ağralıoğlu, N. (2005). Baraj Planlama ve Tasarımı, Cilt 2, Su Vakfı Yayınları, İstanbul, 259s.
- Andriolo, F.R. (1998). The use of roller compacted concrete. Oficina de textos.
- Andriolo, F.R., & Polat, O. (2006). Beydağ Barajı Gövde İnşaatında Kullanılacak SSKD Agregası Raporu, İzmir, 17p.
- ASTM C494/494M-99a, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- Atış, C. D. (2001). Uçucu Kül içeren Silindirle Sıkıştırılabilen Betonların Özellikleri. Turk J Engin Environ Sci, 503-515.
- Benouadah, A., Beddar, M., & Meddah, A. (2017). Physical and mechanical behaviour of a roller compacted concrete reinforced with polypropylene fiber. Journal of Fundamental and Applied Sciences, 9(2), 623-635.
- Cao, C., Sun, W., & Qin, H. (2000). The analysis on strength and fly ash effect of roller-compacted concrete with high volume fly ash. Cement and concrete research, 30(1), 71-75.
- Courard, L., Michel, F., & Delhez, P. (2010). Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete. Construction and Building Materials, 24(3), 390-395.
- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., & Degeimbre, R. (2009). Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. Construction and Building Materials, 23(11), 3382-3387.
- Delatte, N., Amer, N., & Storey, C. (2003). Improved management of RCC pavement technology. UTCA Report, 1231, 54.
- Erdoğan, T.Y. (2003). Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 741s.
- Gauthier, P., & Marchand, J. (2005). Design and Construction of Roller Compacted Concrete Pavements in Quebec, the Association beton Québec (ABQ), The Cement Association of Canada (CAC), 111p.
- Hansen, K.D., & Reinhardt, W.G. (1991). Roller Compacted Concrete Dams, McGraw-Hill, Inc., 298p.

- Hashemi, M., Shafiqh, P., Karim, M. R. B., & Atis, C. D. (2018). The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 169, 553-566.
- Horzum, U., (2009). Silindirle sıkıştırılmış betonun basınç dayanımının hızlandırılmış deney yöntemleri kullanılarak belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Kiran, Y.M.S., Rao, S.K., & Babuji, Y.K. (2015). Effect of Mineral Admixture on Strength Properties of Roller Compacted Concrete. *International Journal of Scientific Research*, 4(9), 265-267.
- Lin, Y., Karadelis, J. N., & Xu, Y. (2013). A new mix design method for steel fibre-reinforced, roller compacted and polymer modified bonded concrete overlays. *Construction and Building Materials*, 48, 333-341.
- Ludwig, D., Nanni, A., & Shoenberger, J. E. (1994). Application of roller-compacted concrete (RCC) technology to roadway paving. Final report (No. Tech Rept CPAR-GL-94-1).
- Malcolm Dunstan and Associates, (2019). Roller compacted concrete dams in Turkey. <http://www.rccdams.co.uk/search-results/?country=turkey>
- Marchand, J., Pigeon, M., Boisvert, J., Isabelle, H. L., & Houdusse, O. (1992). Deicer salt scaling resistance of roller-compacted concrete pavements containing fly ash and silica fume. *Special Publication*, 132, 151-178.
- Mehta, P.K., & Monteiro, P.J.M. (2006). *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*, Third Edition, McGraw-Hill, 659p.
- Mindness, S., Young J.F., & Darwin D. (2003). *Concrete*, Second Edition, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458, 644p.
- Neocleous, K., Angelakopoulos, H., Pilakoutas, K., & Guadagnini, M. (2011). Fibre-reinforced roller-compacted concrete transport pavements. *Proceedings of the ICE-Transport*, 164(TR2), 97-109.
- Özkan, Ö. (2006). Çelikhane ve yüksek Fırın Cürufu Katkılı Portland Çimentosunun Özellikleri, *_MO Teknik Dergi*, 257: 3893-3902.
- PCA. (2006). Portland Cement Association, Production of Roller Compacted Concrete.
- Pigeon, M., Beaupre, D., Marchand, J., & Reid, E. (1998). Le service d'expertise en matériaux, un outil de transfert technologique. In *Material science and concrete properties. International meeting* (pp. 341-348).
- Piggott, R.W. (1999). *Roller Compacted Concrete Pavements, A Study of Long Term Performance*, Portland Cement Concrete – Research & Development RP366.01P, 62p.
- Postacıoğlu, B. (1986). *Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar Cilt-1*.
- Qasrawi, H.Y., Asi, I.M., & Wahhab, H.A.A. (2005). Proportioning RCCP mixes under hot weather conditions for a specified tensile strength. *Cement and Concrete Research*, 35(2), 267-276.
- Rao, S.K., Sravana, P., & Rao, T.C. (2015). Investigation on pozzolanic effect of mineral admixtures in roller compacted concrete pavement. *i-manager's Journal on Structural Engineering*, 4(2), 28-38.
- Rao, S.K., Sravana, P., & Rao, T.C. (2016). Investigating the effect of M-sand on abrasion resistance of roller compacted concrete containing GGBS. *Construction and Building Materials*, 122, 191-201.
- Reid, E., Marchand, J., & Ouellet, E. (2000). *Mechanical Properties and Frost Durability of Low binder Content RCC. Transportation 2000*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C., USA, 11 pages.
- Rooholamini, H., Hassani, A., & Aliha, M. R. M. (2018). Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, 159, 517-529.
- Saluja, S., Kaur, K., Goyal, S., & Bhattacharjee, B. (2019). Assessing the effect of GGBS content and aggregate characteristics on drying shrinkage of roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 201, 72-80.
- Sun, W., Liu, J., Qin, H., Zhang, Y., Jin, Z., & Qian, M. (1998). Fatigue Performance and Equations of Roller Compacted Concrete with Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, 28(2): 309-315.

Tokyay, M., & Erdoğan, K. (2001). *Cürüfler ve Cürüflü Çimentolar*, TÇMB AR-GE Enstitüsü, Ankara.

Topličić-Ćurčić, G., Grdić, D., Ristić, N., & Grdić, Z. (2015). Properties, materials and durability of rolled compacted concrete for pavements. *Zaštita materijala*, 56(3), 345-353.

TS EN 197-1 “Genel Çimentolar- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standardları Enstitüsü, 2002.

USACE. (2000). *Roller Compacted Concrete*. US Army Corps of Engineers, Engineer Manual, EM 1110-2-2006, 56p.

U.S. Department of the Interior BR. (1987). *Guidelines for Designing and Constructing Roller-compacted Concrete Dams*. ACER Technical Memorandum no.8, U.S. Deptt. of Interior, Bureau of Reclamation, USA, 86p.

Vahedifard, F., Nili, M., & Meehan, C. L. (2010). Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low cement roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2528-2535.

Zdiri, M., Abriak, N. E., Ouezdou, M. B., & Neji, J. (2009). The use of fluvial and marine sediments in the formulation of roller compacted concrete for use in pavements. *Environmental technology*, 30(8), 809-815.

Zhang, W., Gong, S., & Zhang, J. (2018). Effect of rubber particles and steel fibers on frost resistance of roller compacted concrete in potassium acetate solution. *Construction and Building Materials*, 187, 752-759.



Düşey Mantolu Sıcak Su Tanklarının Isıl Performanslarının Enerji Yükleme ve Boşaltma Periyotlarında Deneysel Olarak İncelenmesi

Experimental Investigation of Thermal Performance of Vertical Mantled Hot Water Tanks in Energy Charging and Discharging Periods

Doğan Erdemir¹

¹Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri, Türkiye

Başyuru/Received: 04/06/2018

Kabul / Accepted: 05/09/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 27/09/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Sıcak su tankları ısı enerji depolamanın yaygın kullanılan metotlarından biridir. Bu çalışmada; güneş enerjili sıcak su ve diğer muhtelif sıcak su elde etme sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılan düşey mantolu sıcak su tanklarının ısı performansları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada 450 litrelik bir düşey mantolu sıcak su tankı için enerji yükleme ve boşaltma periyotlarındaki sıcaklık tabakalaşması farklı çalışma koşullarında araştırılmıştır. Manto giriş sıcaklığı 50, 60 ve 70 °C, manto debisi 2.5, 5 ve 7.5 l/dk ve şebeke debisi 5, 10 ve 15 l/dk olarak alınmıştır. Deneyler sırasında şebeke giriş sıcaklığı ve ortam sıcaklığı sabit kalmıştır. Deneylerde ilk olarak 3 saatlik süre boyunca enerji yükleme periyodu gerçekleştirilmiştir. Ardından ise kullanım suyu çıkış sıcaklığı 30 °C'ye düşene kadar enerji boşaltma periyodu gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda; farklı işletme şartlarında tank içerisindeki sıcaklıkların zamanla değişim davranışı yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür. Ayrıca, tanktan edilen sıcak miktarı üzerinde, şebeke giriş debisinin önemli bir etkiye sahip olduğu ve artan her 5 l/dk debinin elde edilen sıcak su miktarını yaklaşık 20 litre düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Düşey mantolu sıcak su tankı, Sıcak su tankı, Güneş enerjili sıcak su sistemi, Isıl enerji depolama”

Abstract

Hot water tanks are one of the common methods of thermal energy storage. In this study, the thermal performance of vertical hot water tanks which are widely used in solar domestic hot water systems and various other hot water obtaining systems are investigated experimentally. In this study, the temperature stratification for a 450-liter vertical mantled hot water tank was investigated under different operating conditions during the energy charging and discharging periods. Mantle inlet temperature was 50, 60 and 70 °C, mantle flow rate was 2.5, 5 and 7.5 l/min and main line flow rate is 5, 10 and 15 l/min. Main line inlet and ambient temperatures remained constant. During the experiments, the energy charging period was carried out for 3 hours. Then the energy ing period was carried out until the domestic water outlet temperature decreased to 30 °C. As a result of the study; it was found that the temperature distribution changing behavior was approximately the same in different operating conditions. Furthermore, it was seen that main line inlet flow rate has a significant effect on the amount of hot water from the tank. When main line flow rate increased 5l/min, the amount of hot water obtained from the tank decreased nearly 20 liters.

Key Words

“Vertical hot water tank, Hot water tank, Solar domestic hot water system, Thermal energy storage”

1. Giriş

Enerji depolama; enerji kaynağının aktif olmadığı dönemlerde de kullanılmasına devam etmek, enerji tüketim maliyetlerini düşürmek ya da enerji pik yüklerini pik olmayan zamanlara kaydırmak için kullanılabilecek en önemli araçlardan biridir. Bu yüzden, enerji dönüşüm sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, yenilebilir enerji kaynakları doğası gereği sürekli olarak aktif olmadıklarından, bu kaynaklardan enerji kaynağı aktif değilken de yararlanmak için enerji depolama yöntemleri kullanılmaktadır. Enerji; her bir enerji türünde depolanmaktadır. Enerji depolama yöntemlerinin avantajları (Dincer and Rosen 2011) tarafından sıralanmıştır. Ayrıca (Acar 2018) teknik uygunluk, çevresel etki, maliyet, ömür gibi kriterler üzerinden enerji depolama sistemlerini karşılaştırmıştır. Isıl enerji depolama, enerji depolama yöntemleri arasında en eski ve olgunlaşmış türlerden biridir. Ayrıca üretilen ve tüketilen enerjinin büyük kısmı da ısı olduğundan ısı enerji depolama sistemleri zaman içerisinde çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir. Güneş enerjili sıcak su sistemleri hem yenilebilir enerji uygulaması hem de enerji depolama uygulaması olarak yaygın kullanılan sistemlerden biridir. Sıcak su depolama tankları, ısı enerji depolamanın en temel uygulamalarından biridir. Bu sebepten sıcak su tanklarının tasarımı, ısı performanslarının belirleme yöntemleri ve ısı performanslarını iyileştirme ile alakalı çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Sıcak su tanklarındaki en önemli performans kriteri tank içerisindeki sıcaklık tabakalaşmasıdır. İyileştirilmiş sıcaklık tabakalaşması sıcak su tanklarının ısı enerji depolama performansını arttırmaktadır.

(Kurşun and Ökten 2018) prizmatik bir sıcak su tankında tankın konumlandırma açısının ve en/boy oranının sıcaklık tabakalaşması üzerindeki etkilerini sayısal olarak araştırmıştır. Çalışmanın sonucunda en iyi sıcaklık tabakalaşmasının tankın yatayla 45° açısı yaptığı ve D/H oranının 0.5 olduğu durumda görülmüştür. (Kurşun 2018) silindirik ve prizmatik sıcak su tanklarında, tank tabanından üst kısımlarına doğru farklı kalınlıklarda yalıtım uygulaması yapılmasının sıcaklık tabakalaşması üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemiştir. Bu çalışmanın sonucunda, prizmatik ya da kesik koni şeklindeki yalıtım uygulamalarının sıcaklık tabakalaşmasını iyileştirdiği tespit edilmiştir. (Arslan and Igci 2015) mantolu ısı değiştiricisine sahip bir sıcak su tankındaki sıcaklık tabakalaşmasını enerji boşaltma dönemi için sayısal olarak incelemiştir. (Erdemir and Altuntop 2016) mantolu sıcak su tanklarındaki sıcaklık tabakalaşmasının tank içerisinde yerleştirilen engeller ile iyileştirilmesini manto ve şebeke çevriminin aktif olduğu durumlarda deneysel olarak araştırmışlardır. Ayrıca yine (Erdemir and Altuntop 2016) sıcaklık tabakalaşmasının düşey mantolu sıcak su tankının enerji ve ekserji verimliliği üzerindeki etkisini incelemiştir. (Chandra and Matuska 2019) sıcak su tanklarının tasarım kriterlerinin ve işletme şartlarının sıcaklık tabakalaşması üzerindeki etkilerini irdeleyen kapsamlı bir derleme ve değerlendirme çalışması gerçekleştirmiştir. (Deng, Furbo et al. 2018) mantolu sıcak su tanklarında manto içerisinde faz değiştiren malzeme kullanımının sıcaklık tabakalaşması üzerindeki etkisini incelemiştir. (Kurşun and Ökten 2016) düşey sıcak su tanklarında farklı D/H oranlarında yalıtım kalınlığının sıcaklık tabakalaşması üzerindeki etkisi araştırmışlardır. (Dragsted, Furbo et al. 2017) sıcak su tanklarında farklı giriş tabakalaştırıcılarının sıcaklık tabakalaşması üzerindeki etkisini incelemiştir. (Bouhal, Fertahi et al. 2017) sıcaklık tabakalaşmasının farklı çalışma koşullarında optimize etmeye yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. (Fan, Furbo et al. 2015) sıcak su tanklarındaki sıcaklık tabakalaşmasını daha iyi tahminlemek için bir simülasyon programı geliştirmişlerdir. (Fan and Furbo 2012) sıcak su tanklarında bekleme periyodunda gerçekleşen ısı kaybının sıcaklık tabakalaşması üzerindeki etkisini incelemiştir. (Kenjo, Inard et al. 2007) düşey mantolu sıcak su tanklarında sıcaklık tabakalaşmasını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. (Assari, Basirat Tabrizi et al. 2018) tank giriş ve çıkışlarının tankın ısı enerji depolama performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. (Dehghan and Barzegar 2011) enerji boşaltma periyodunda tankın sıcaklık tabakalaşmasının nasıl etkilendiğini belirlemek için sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. (Zachár 2015) serpantinli bir sıcak su tankında yeni helisel bir dağıtıcı kullanımının enerji boşaltma döneminde sıcaklık tabakalaşması üzerindeki etkisini araştırmışlardır. (Fertahi, Jamil et al. 2018) sıcaklık tabakalaşmasını iyileştiren ve sıcaklık tabakalaşmasının derecesini belirleyen parametreleri inceleyen bir derleme ve değerlendirme çalışması yapmışlardır.

Güneş enerjili sıcak ısıtma sistemleri hem yenilenebilir enerji uygulaması hem de ısı enerji uygulaması olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yüzden, sıcak su depolarının performanslarının iyileştirilmesi bir mühendislik uygulaması olarak önemli bir konudur. Bu çalışmanın temel amacı, düşey mantolu sıcak su tanklarındaki sıcaklık tabakalaşmasının farklı çalışma koşulları altında nasıl etkilendiğini deneysel olarak belirlemektir. Bu kapsamda, güneş enerjili ve diğer sıcak su elde sistemlerinde yaygın olarak kullanılan düşey mantolu sıcak su tankındaki sıcaklık tabakalaşması enerji boşaltma ve yükleme periyotlarında incelenmiştir. Ayrıca farklı çalışma koşullarında tanktan ne kadar sıcak su temin edilebileceği deneysel olarak araştırılmıştır.

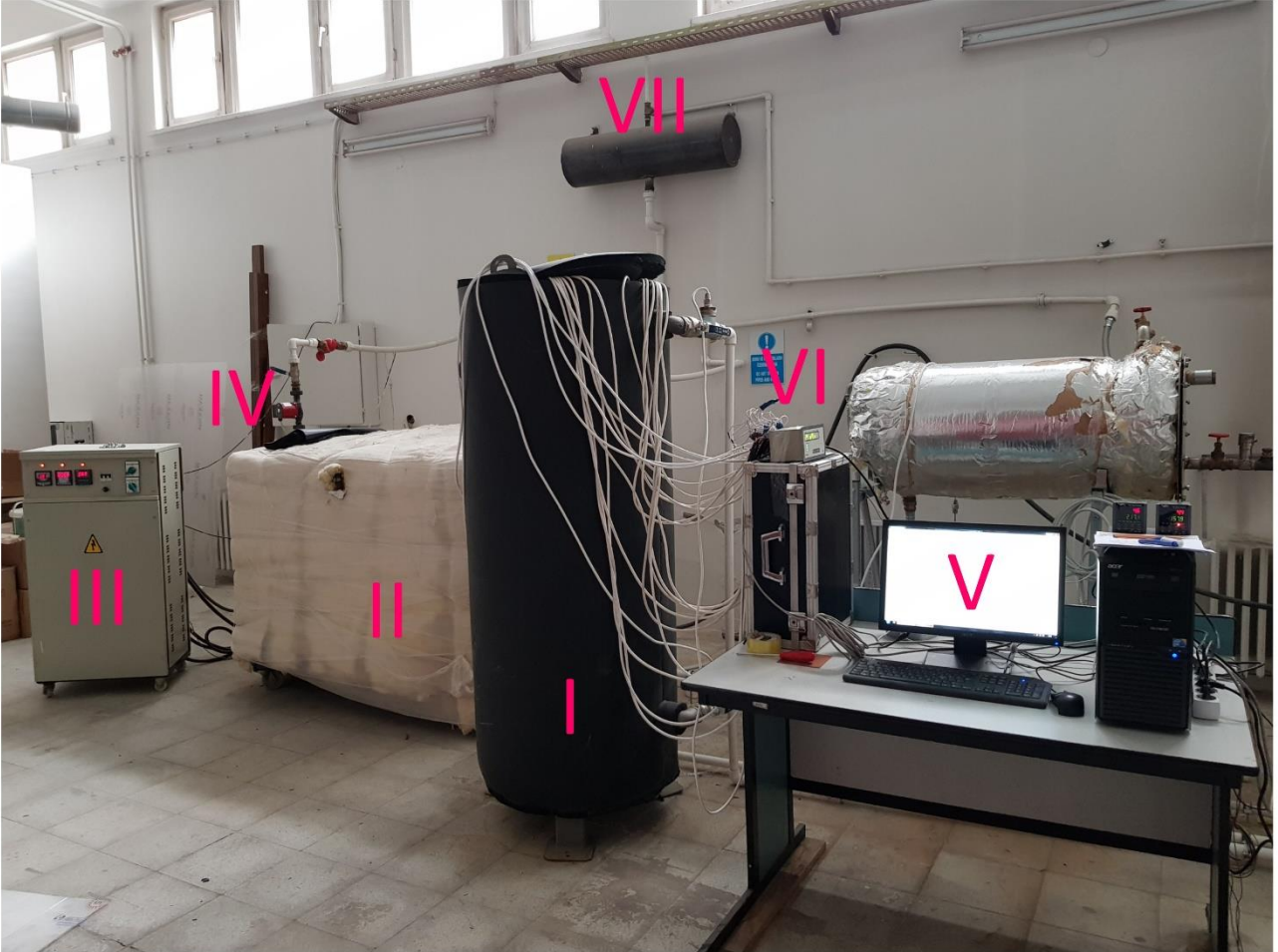
Terminoloji

$T_{m,g}$	Manto giriş sıcaklığı
$T_{m,\zeta}$	Manto çıkış sıcaklığı
$T_{\zeta,g}$	Şebeke giriş sıcaklığı
$T_{\zeta,\zeta}$	Şebeke çıkış sıcaklığı
V_{manto}	Manto debisi
$V_{\zeta,şebeke}$	Şebeke debisi
S	Sensör

2. Materyal ve Metot

2.1. Deney Sistemi

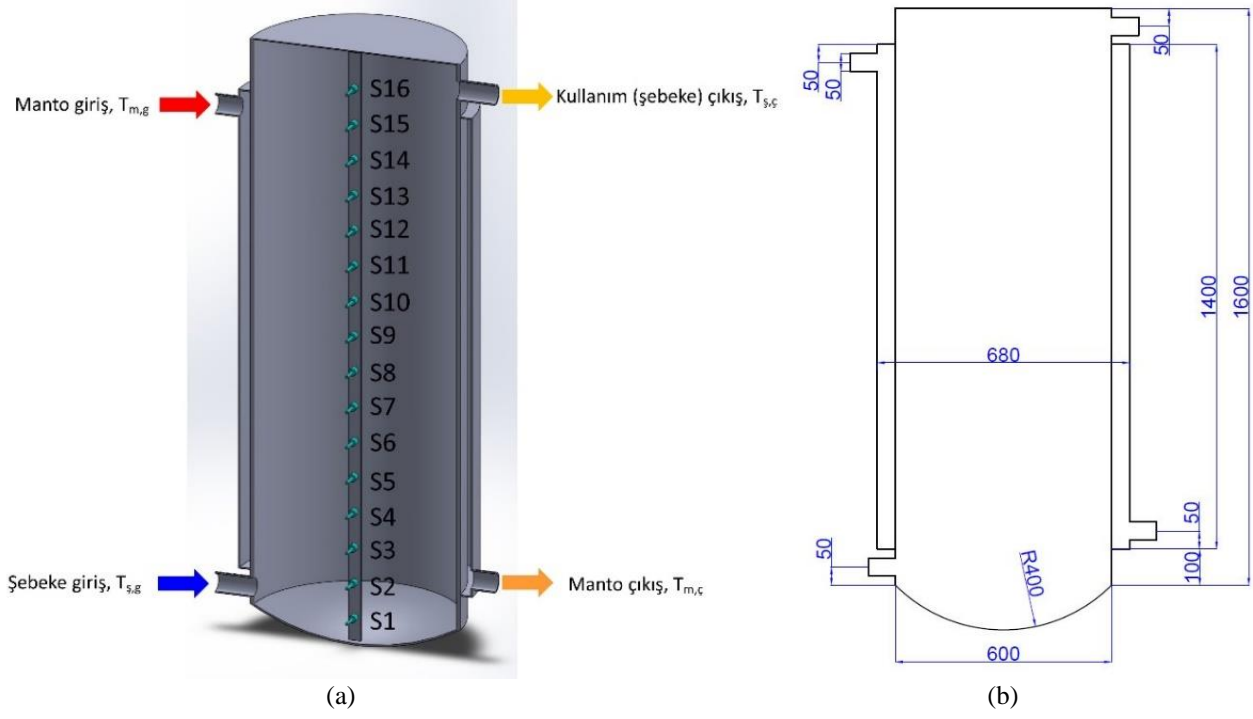
Bu çalışmada Şekil 1’de görülen deney sistemi kullanılmıştır. Şekil 1’den görüldüğü üzere, deney sistemi; test tankı, ısıtıcı, varyak trafo, pompa, bilgisayar, veri toplayıcı ve genişleme tankından oluşmaktadır. Ayrıca manto ve şebeke çevrimindeki akışkan debisini ölçmek için 2 adet debimetre kullanılmıştır. Tankın içerisindeki, giriş ve çıkışlarındaki sıcaklıklar PT100 tipi termokupllar ile ölçülmüştür. Manto ve şebekeden geçen akışkanların debisini kontrol etmek için vanalar kullanılmıştır. Isıtıcı tank (II) içerisinde toplamda 15 kW güce sahip rezistans bulunmaktadır ve rezistanslara varyak trafo (III) vasıtası ile farklı akımda güç sağlanarak test tankı için sıcak su üretilmektedir. Isıtıcı içerisindeki üretilen suyun sıcaklığını ± 2 °C sıcaklıkta sabit tutmak için varyak trafonun üzerindeki bir otomatik kontrol birimi bulunmaktadır. Isıtıcı tanktaki su, bir sirkülasyon pompası (IV) aracılığıyla test tankının manto kısmına pompalanmaktadır. Şebeke çevrimi ise direk olarak ana şebekeden alınan su ile sağlanmaktadır. Bu yüzden deneylerde şebeke suyu giriş sıcaklığı yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Deney sistemindeki sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan hacim değişimlerinin sisteme zarar vermemesi için bir genişleme tankı (VII) entegre edilmiştir. Termokupllardan ve debimetrelerden gelen bilgileri toplamak ve işlemek için bir adet ELİMKO E680 marka ve model veri toplayıcı (VI) kullanılmıştır. Veri toplayıcı sistemi ile her 10s bir ölçüm değerleri alınmıştır. Alınan verilerin işlenmesi ve kaydedilmesi için bir adet bilgisayar (V) kullanılmıştır. Debi ölçümlerinde KOBOLT DPM marka debimetreler kullanılmıştır. Debi ölçümleri $\pm\%1.5$ ve sıcaklık ölçümleri ise ± 0.5 °C hassasiyet ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil. 1. Deney sisteminin görünümü (I: test tankı, II: ısıtıcı, III: varyak trafo, IV: pompa, V: bilgisayar, VI: veri toplayıcı, VII: genişleme tankı)

2.2. Test Tankı

Bu çalışmada Şekil 1’de görülen ve Şekil 2’de şematik verilmiş olan 450 litre depolama hacmine sahip düşey mantolu sıcak su tankı kullanılmıştır. Tankın ölçüleri Şekil 2.b’de verilmiştir. Tank 1.5 mm kalınlığında paslanmaz çelik levhadan üretilmiştir. Tankın giriş ve çıkışları 50 mm çaptadır. Tanktan çevreye olan ısı kaybını azaltmak için tankın üzeri 6 cm kalınlığında kauçuk köpük yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Tankın içerisine tank tabanından her 10 cm’de bir sıcaklık ölçümü almak için 16 adet termokupl yerleştirilmiştir. Termokuplların tank içerisinde sabit konum tutmak için 40 mm genişliğinde bir çubuk kullanılmıştır. Şekil 2.a’dan görüldüğü üzere, termokupllar tankın alt tarafından üst tarafına doğru S1, S2 ... S16 olarak sırasıyla adlandırılmıştır.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan düşey mantolu sıcak su tankının (a) Şematik gösterimi; (b) Ölçüleri

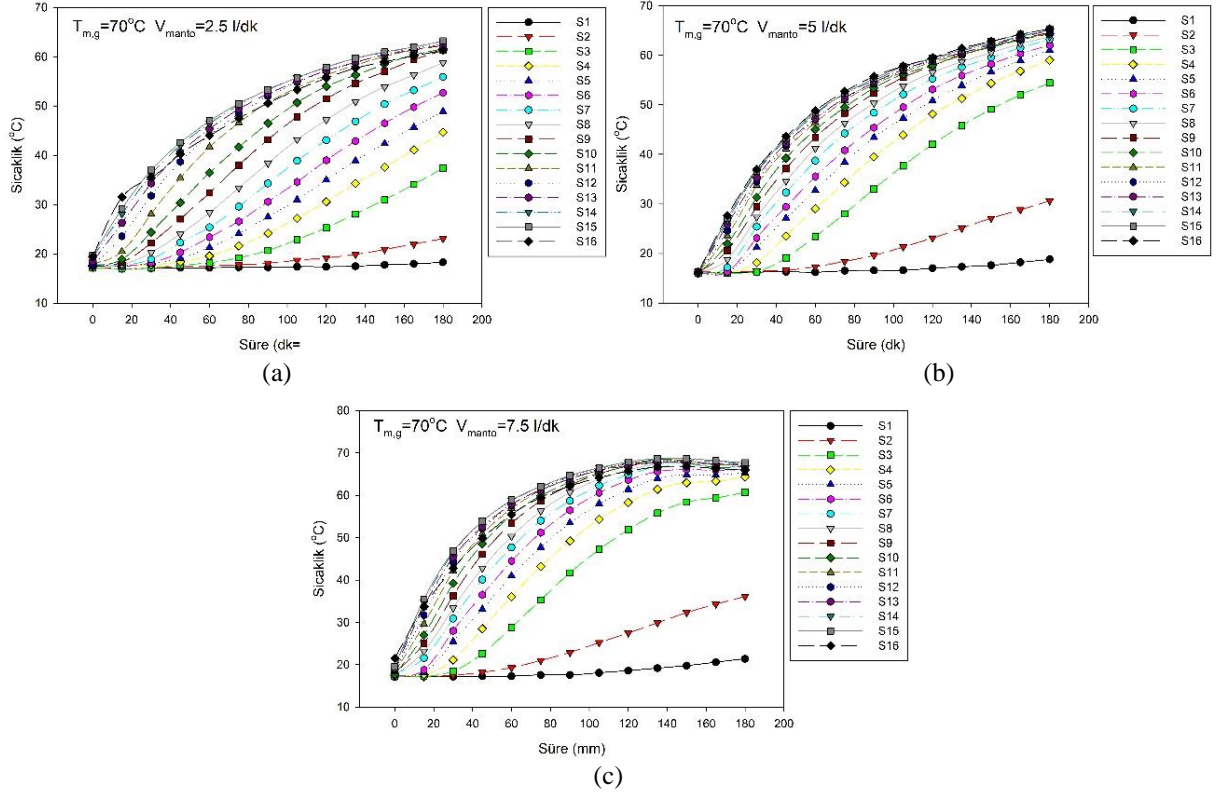
2.3. Deney Prosedürü

Bu çalışma kapsamında, üç farklı manto giriş sıcaklığının (50, 60 ve 70 °C), üç farklı manto giriş debisinin (2.5, 5, 7.5 l/dk) ve üç farklı şebeke giriş debisinin (5, 10 ve 15 l/dk) sıcaklık tabakalaşması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında şebekeden gelen su direk olarak kullanıldığı için şebeke suyu sıcaklığı çalışma boyunca yaklaşık olarak 18 °C'de kalmıştır. Deneyler sırasında ilk olarak enerji yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Enerji yükleme deneyinde manto çevrimi aktif hale getirilmiş ısıtıcıda (II) belli sıcaklıkta tutulan sıcak su pompa (IV) aracılığı ile test tankına (I) yollanmıştır. Böylece test tankı (I) içerisindeki su ısıtılmıştır. Enerji yükleme periyodu 3 saatlik bir süre için gerçekleştirilmiştir. Enerji yükleme deneyinin tamamlanmasının hemen ardından enerji boşaltma deneyi yapılmıştır. Enerji boşaltma periyodunda tank içerisindeki depolanan sıcak su, şebekeden gelen suyun tanka gönderilmesi ile tanktan alınmıştır. Enerji boşaltma periyodunda manto çevrimi kapalı durumdadır. Deneysel sırasında tank içerisinden 16 sıcaklık, tankın giriş ve çıkışlarındaki 4 sıcaklık ve 1 ortam sıcaklığı olmak üzere 21 sıcaklık değeri her 10 s'de bir ölçülmüştür. Manto ve şebeke hatlarındaki suyun debisi ise anlık olarak yine her 10 s'de ölçülerek kaydedilmiştir. Ayrıca deneyler sırasında manto çevriminde dolaşan toplam su hacmi ve tanktan alınan toplam sıcak su miktarı da ölçülmüştür.

3. Bulgular ve Tartışma

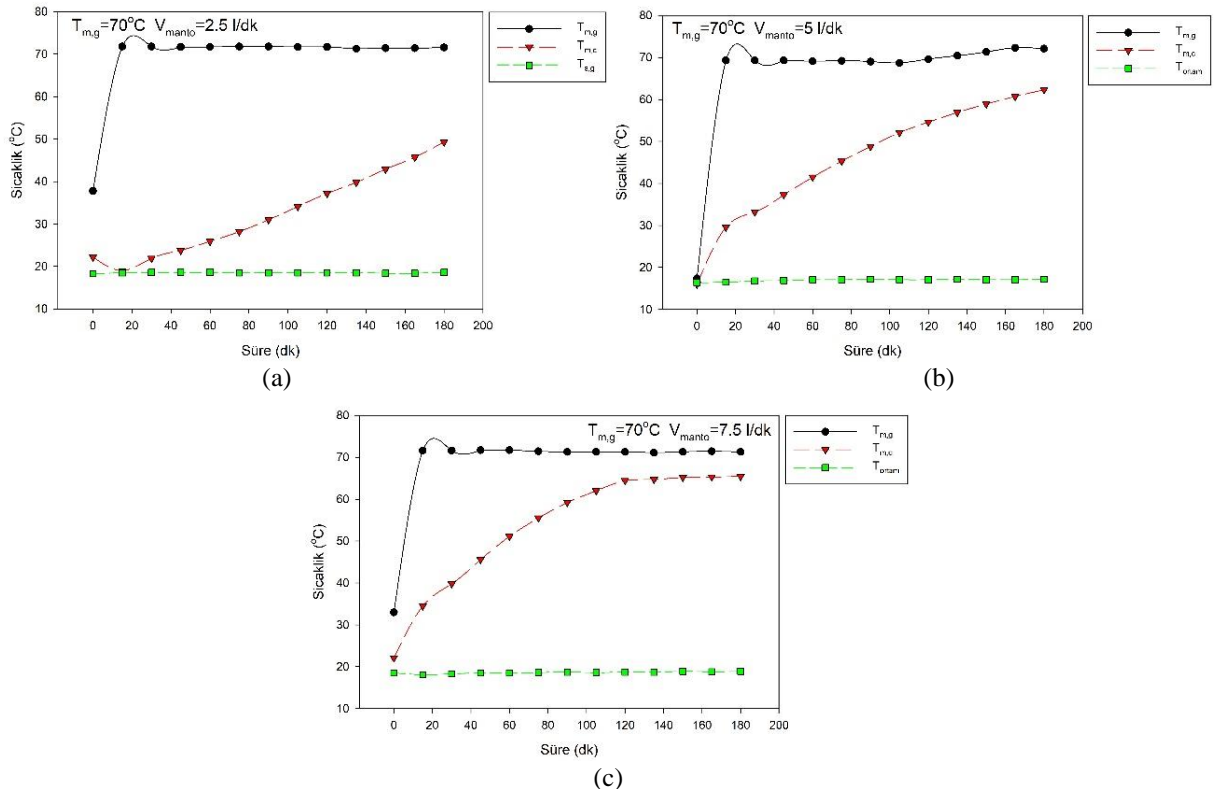
3.1. Enerji Yükleme Periyodu için Sonuçlar

Düşey mantolu sıcak su tanklarının kullanıldığı sıcak su hazırlama sistemlerinde enerji yükleme periyodunda sadece manto çevrimi çalışır ve iç tank içerisindeki suyun sıcaklığı artırılır. Şekil 3'de manto giriş sıcaklığının $T_{m,g}=70$ °C olduğu durumda farklı manto debileri için sıcaklık dağılımının zamanla değişimini göstermektedir. Deneylerin başlangıcında tank içerisinde tüm yüksekliklerde yaklaşık şebeke giriş suyu sıcaklığında bulunmaktadır. Yani tank içerisinde sıcaklık tabakalaşması yoktur. Enerji yükleme periyodunun başlamasıyla beraber tank içerisindeki sıcaklık tabakalaşması oluşmaya başlamıştır. 180 dakikalık test süresi sonunda, Şekil 3'de tüm durumlar için tankın tabanından 200 mm mesafede bir soğuk su bölgesi bulunduğu görülmektedir. Manto debisinin $\dot{V}_m = 2.5$ l/dk olduğu durumda (Şekil 3.a) tank tabanından 300 mm sonra sıcaklık artmaya başlamış, tankın yarısından (800 mm) sonra hemen hemen 60 °C sıcaklıkta bir sıcak su bölgesi vardır. Artan manto giriş debisiyle (Şekil 3.b ve Şekil 3.c) tank tabanından 200 mm ve 800 mm arasında olan sıcaklık tabakalaşmasının etkisi azalmıştır. 400 mm mesafeden sonra tank içerisinde sıcak su bölgesi oluşmuştur. Sıcak su bölgeleri $\dot{V}_m = 5$ l/dk için yaklaşık olarak 63 °C iken, $\dot{V}_m = 7.5$ l/dk için ise 65 °C'dir. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere, artan manto debisi ile tank içerisindeki sıcaklık seviyesi artmıştır. Bu duruma artan manto debisi ile manto ve iç tank arasındaki ısı geçiş katsayısının artması neden olmuştur. Bu çalışma kapsamında irdelenen tüm durumlarda, enerji yükleme periyodundaki sıcaklık dağılım davranışı Şekil 3'deki durumla benzerlik göstermiştir.



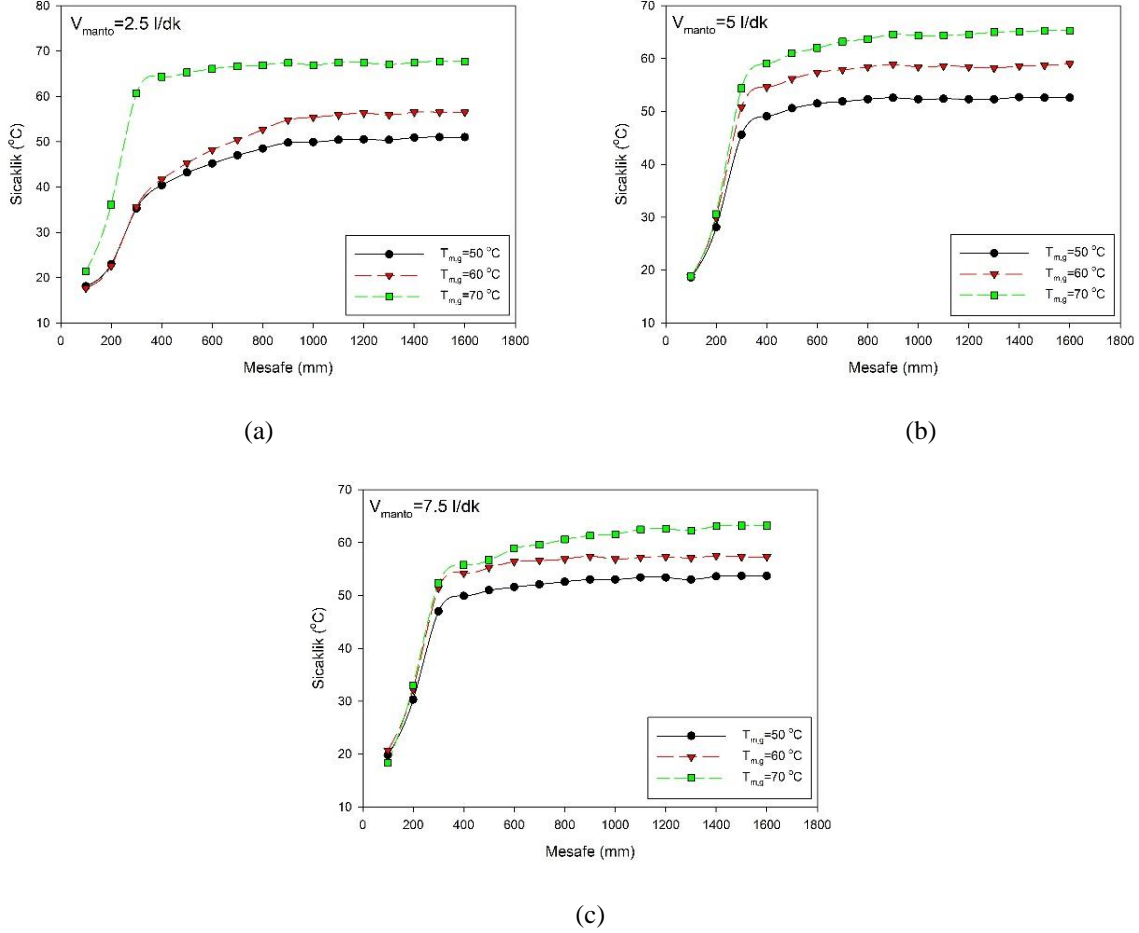
Şekil 3. $T_{m,g} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda farklı manto giriş hızları için tank içerisindeki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi (a) $\dot{V}_m = 2.5\text{ l/dk}$; (b) $\dot{V}_m = 5\text{ l/dk}$; (c) $\dot{V}_m = 7.5\text{ l/dk}$

Enerji yükleme periyodunda manto giriş/çıkış ve ortam sıcaklığının zamanla değişimi Şekil 4’te görülmektedir. Şekil 4’ten manto debisinin tanka yüklenen enerji üzerindeki etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Artan manto debisi ile manto ile iç tank arasındaki yüzeydeki ısı geçiş miktarı artar. Çünkü artan debi manto içerisindeki akışın Reynold sayısı değerini arttırmaktadır. Artan Reynold sayısı ile türbülans etkileri arttığından ortalama ısı geçiş kat sayısı da artmaktadır. Bu sayede tanka daha fazla miktarda enerji yüklenir. Manto giriş hızının $\dot{V}_m = 2.5\text{ l/dk}$ ve $\dot{V}_m = 5\text{ l/dk}$ olduğu durumda manto çıkış sıcaklığı kararlı hale ulaşmazken, $\dot{V}_m = 7.5\text{ l/dk}$ olduğu durumda test süresinin 130 dakikasından itibaren kararlı koşullara ulaşmıştır. Ayrıca Şekil 3 ve Şekil 4 beraber değerlendirildiği zaman, artan ısı geçişi ile tank içerisindeki suyun sıcaklığının da arttığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4. $T_{m,g} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda farklı manto giriş hızları için manto giriş/çıkış ve ortam sıcaklıklarının zamanla değişimi (a) $\dot{V}_m = 2.5\text{ l/dk}$; (b) $\dot{V}_m = 5\text{ l/dk}$; (c) $\dot{V}_m = 7.5\text{ l/dk}$

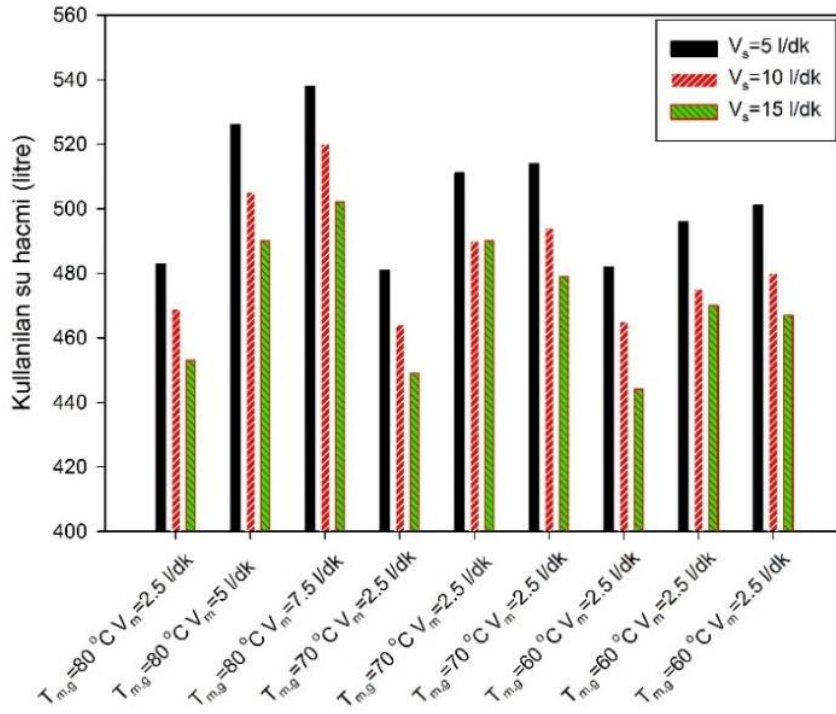
Şekil 5'te incelenen bazı durumlar için 180 dakikalık enerji yükleme periyodu sonundaki tank içerisindeki sıcaklık görülmektedir. Şekil 5'ten görüldüğü üzere, manto giriş sıcaklığı ile tank içerisindeki sıcaklık seviyesi önemli ölçüde değişim göstermiştir. Manto giriş sıcaklığındaki 10 °C artış, tank içerisindeki sıcaklığı yaklaşık olarak 5 °C artırmıştır. $\dot{V}_m = 2.5 \text{ l/dk}$ ve manto giriş sıcaklıklarının daha düşük olduğu $T_{m,g} = 50 \text{ °C}$ ve $T_{m,g} = 60 \text{ °C}$ olduğu durumda tank içerisindeki yaklaşık 100 cm'ye kadar sıcaklık tabakalaşması bölgesi vardır. Artan manto giriş sıcaklığı ile $T_{m,g} = 70 \text{ °C}$ olduğu durumda tabakalaşma tank tabanından 40 cm'ye kadar görülmüştür. Manto giriş debisinin $\dot{V}_m = 5 \text{ l/dk}$ ve $\dot{V}_m = 7.5 \text{ l/dk}$ olduğu durumlarda tüm manto giriş sıcaklıklarında yaklaşık olarak tank tabanından 50 cm'ye kadar sıcaklık tabakalaşması vardır. Tank içerisindeki sıcaklık tabakalaşması durumları göz önünde bulundurulduğu zaman, daha fazla miktarda ve yüksek sıcaklıkta su depolamak için manto giriş debisinin ve sıcaklığının yüksek olması gerekmektedir.



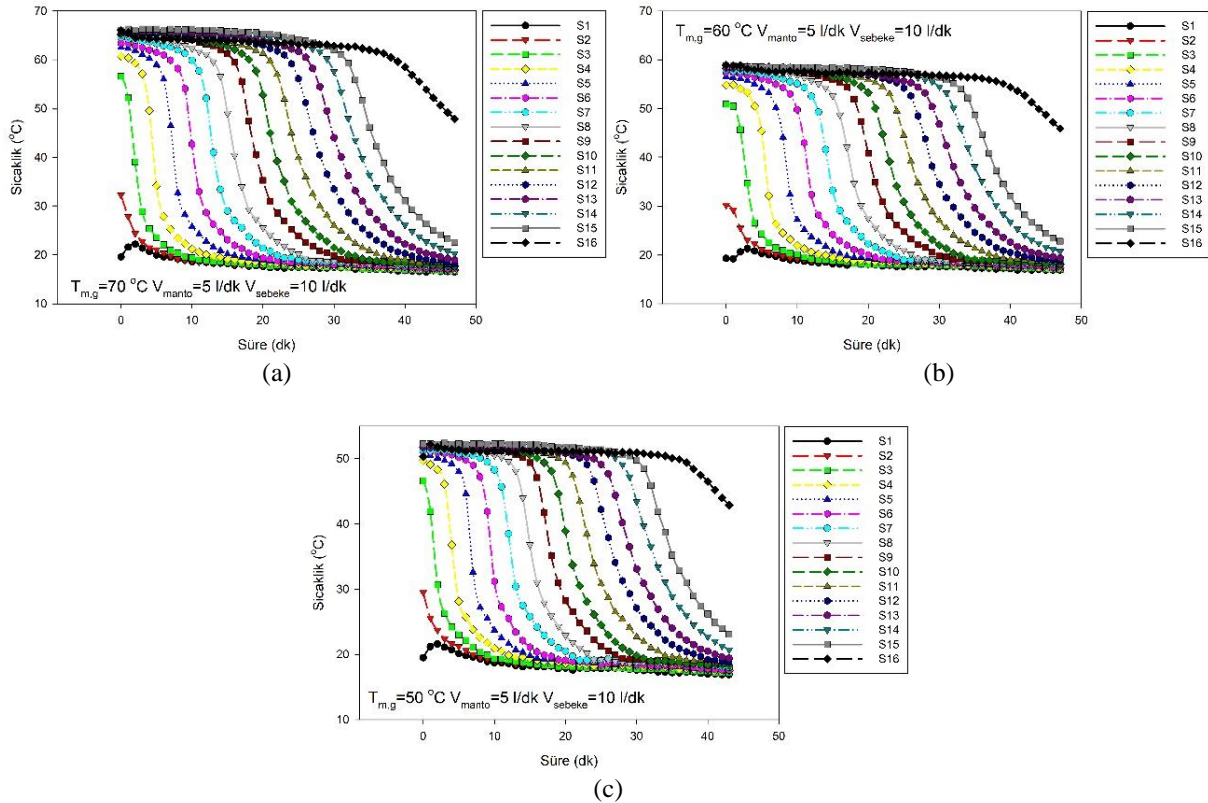
Şekil. 5. 180 dk'lık enerji yükleme periyodu sonunda manto giriş debilerine göre gruplandırılmış tank içerisindeki sıcaklık dağılımı (a) $\dot{V}_m = 2.5 \text{ l/dk}$; (b) $\dot{V}_m = 5 \text{ l/dk}$; (c) $\dot{V}_m = 7.5 \text{ l/dk}$

3.2. Enerji Yükleme Periyodu için Sonuçlar

Enerji boşaltma periyodu, bir sıcak su tankı için depolanan suyun direk olarak kullanılmasıdır. Kullanılacak suyun sıcaklık seviyesi ve miktarı bir sıcak su tankı için önemli performans ve memnuniyet kriterlerinden biridir. Genellikle bir sıcak su tankından mümkün olan en yüksek sıcaklıkta ve miktarda sıcak su elde edilmek istenir. Bu çalışmada enerji boşaltma periyodu, yükleme periyodunun hemen ardından başlatılmış ve kullanım suyu çıkış sıcaklığı 30 °C'ye düşene kadar sürdürülmüştür. Bu çalışmada incelenen tüm durumlar için tanktan elde edilen sıcak su miktarları Şekil 6'da verilmiştir. **Error! Reference source not found.**'dan görüldüğü üzere, şebeke giriş debisi tanktan alınan sıcak su miktarı üzerindeki önemli etkiye sahiptir. Aynı manto giriş sıcaklığı ve debisinde artan şebeke giriş debisi ile kullanılan sıcak su miktarı azalmıştır. Şebeke giriş debisi her 5 l/dk arttığında elde edilen sıcak su miktarı yaklaşık olarak 20 l düşmüştür. Bu durum üzerinde en önemli etken tank girişinde yüksek akışkan hızına bağlı olarak karışma etkisinin artmasıdır. Şekil 6'dan manto giriş debisinin artmasıyla tanktan alınan sıcak su miktarının arttığı görülmektedir. Çünkü artan manto debisiyle sisteme daha enerji yüklendiği için sistemden daha fazla miktarda sıcak su elde edilebilmektedir, başka bir deyişle daha fazla miktarda enerji boşaltılabilmektedir. Artan manto giriş sıcaklığı ile tanktan elde edilen sıcak su miktarı da artmaktadır. Ancak bu artış manto debisinin ve şebeke giriş debisinin etkisine bakarak daha az seviyededir. Çünkü artan manto giriş sıcaklığı ile tank içerisindeki daha yüksek sıcaklıkta bu depolanmaktadır (Şekil 4). Bu durum ise bir miktar daha fazla sıcak su elde etmeye olanak sağlamaktadır.

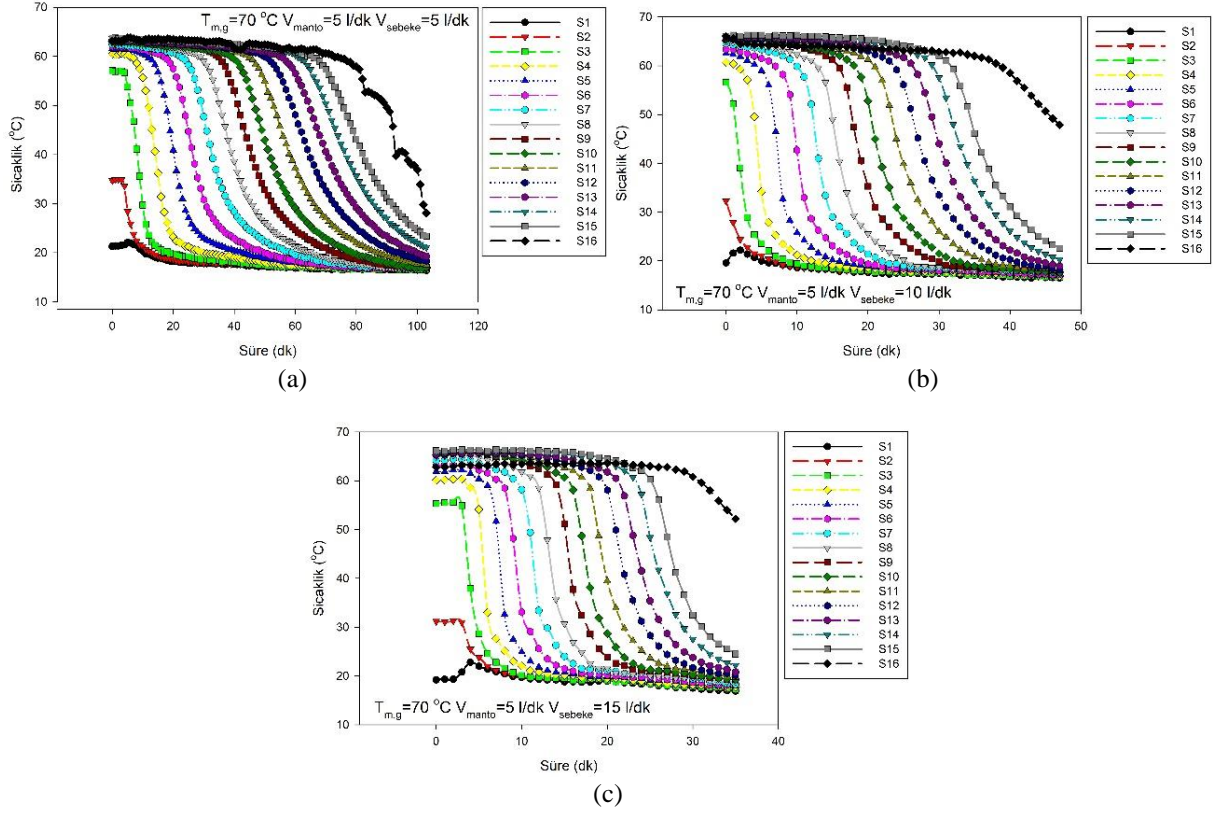


Şekil 6. İncelenen tüm durumlar için enerji boşaltma periyodunda tanktan elde edilen sıcak su miktarları



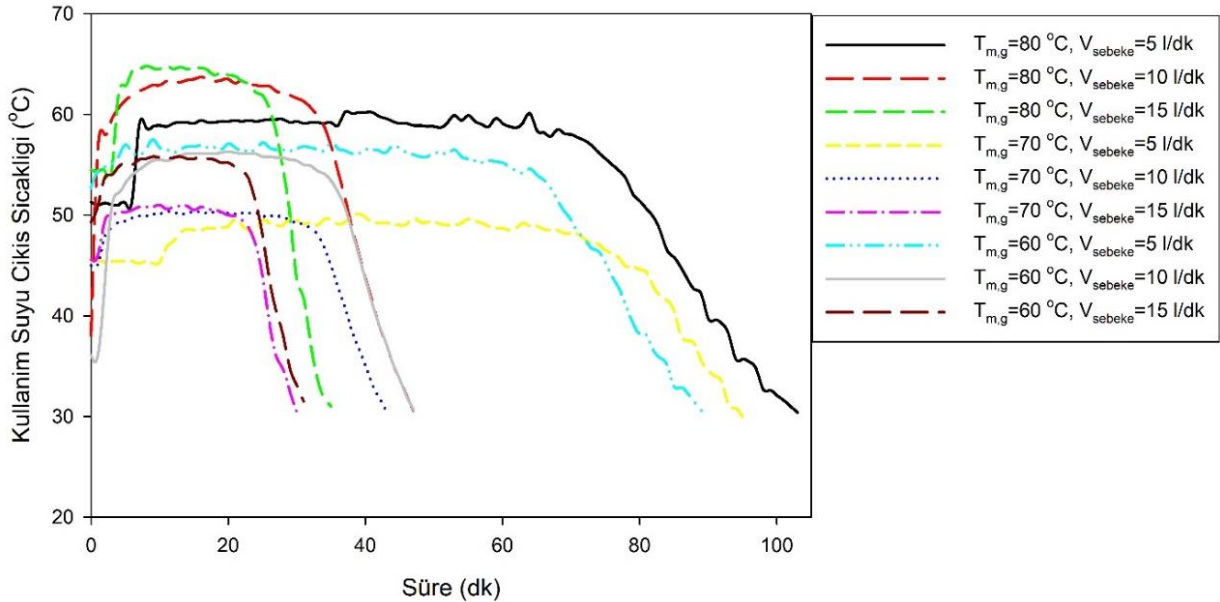
Şekil 7. (a) $T_{m,g} = 80$ °C ve $\dot{V}_m = 5$ l/dk; (b) $T_{m,g} = 70$ °C ve $\dot{V}_m = 5$ l/dk; (c) $T_{m,g} = 60$ °C ve $\dot{V}_m = 5$ l/dk olduğu durumlarda tank içerisindeki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi

Şekil 7’de farklı manto giriş sıcaklıkları ile aynı manto giriş debisinde enerji yüklenmiş ve sabit enerji boşaltma debilerindeki sıcaklık dağılımlarının zamanla değişimi görülmektedir. Şekil 7’den görüldüğü üzere, tank içerisindeki sıcaklık tank tabanından başlayarak zaman içerisinde soğumaya başlamıştır. Tankın en üst kısmında kalan yüksek sıcaklık bölgesi nedeni sıcaklık sensörünün bulunduğu seviyenin kullanım suyu çıkış seviyesinin üst kısmında kalmasıdır. Bu bölgede kalan sıcak havadan hacmi bulunmaktadır. Tank içerisindeki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi, farklı manto giriş debileri, manto giriş debileri ve şebeke giriş debileri için benzer davranışı göstermiştir.



Şekil. 8. Farklı şebeke giriş debileri için tank içerisindeki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi (a) $\dot{V}_{sebeke} = 5 \text{ l/dk}$; (b) $\dot{V}_{sebeke} = 10 \text{ l/dk}$; (c) $\dot{V}_{sebeke} = 15 \text{ l/dk}$

Şekil 8'de şebeke giriş debisinin tank içerisindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi görülmektedir. Beklendiği üzere tank içerisindeki sıcaklık seviyesi yüksek şebeke giriş debilerinde daha hızlı düşmektedir. Şekil 8.a'da görüldüğü üzere, tankın üst kısmındaki hava hacmine bağlı olarak kalan sıcak bölge, şebeke giriş debisinin düşmesi ile daha düşük seviyelere gerilemiştir. Bu durum zaman içerisinde çevreye olan ısı kaybının artmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 7 ve Şekil 8'den görüldüğü üzere, tank içerisindeki sıcaklık dağılımı karakteristiği tüm çalışma koşullarında benzerdir. Enerji boşaltma döneminde tank içerisindeki sıcaklık, tank tabanından üst kısımlarına doğru katman katman düşmüştür. Sıcaklığı düşen bölgenin yerini şebeke suyu sıcaklığında soğuk su hacmi almıştır. Şebeke debisine göre sıcaklık düşümünün tank içerisindeki yayılması artan şebeke hızı ile artmıştır. Tank içerisindeki sıcaklık dağılımları tek başına enerji boşaltma periyodundaki performansı değerlendirmede yeterli olmayacağından, Şekil 7 ve Şekil 8'den elde edilen bulgular Şekil 6 ile değerlendirildiği zaman, şebeke giriş debisinin daha düşük olmasının sıcak su elde etme açısından daha iyi performans sağlayacağı görülmektedir.



Şekil. 9. Kullanım suyu çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (not: tüm durumlarda şebeke giriş debisi 5 l/dk'dır)

Kullanım suyu sıcaklığının zamanla değişimi Şekil 9'da görülmektedir. Şekil 9'dan görüldüğü üzere, tank içerisindeki en yüksek sıcaklık seviyesindeki su belli bir süreye kadar tanktan elde edilmiştir. Daha sonra kullanım suyu çıkış sıcaklığı hızla 30°C'ye düşmüştür. Suyun sıcaklığının düşme davranışı, tank içerisindeki sıcaklık seviyesi göre değişse de aynı sıcaklık seviyesi için benzerdir. Şekil 9'dan elde edilen bulgulardan görüldüğü üzere, tanktan elde edilen sıcak su miktarını arttırmak için ya en yüksek seviyeden alınan sıcak su miktarını arttırmak ya da sıcaklık düşümü sırasında geçen süreyi uzatmak gerekmektedir. Şekil 6 ve Şekil 9 birlikte değerlendirildiği zaman, bir düşey mantolu sıcak su tankından maksimum miktarda sıcak su elde etmek için şebeke giriş debisinin düşük olması gerekmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada sıcak su hazırlama sistemlerinde yaygın olarak kullanılan düşey mantolu sıcak su tanklarındaki sıcaklık tabakalaşmasını enerji yükleme ve boşaltma periyotları için deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada farklı manto giriş debisi, manto giriş sıcaklığı ve şebeke giriş debisinin etkileri araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Enerji yükleme periyodunda artan manto debisi ve manto giriş sıcaklığı tankta yüklenen enerji miktarını ve dolayısı ile tank içerisindeki sıcaklık seviyesini arttırmıştır.
- Enerji yükleme periyodunda farklı manto debisi ve manto giriş sıcaklığı ile tank içerisindeki sıcaklık dağılım karakteristiği önemli ölçüde değişmemiştir. Sıcaklık dağılım karakteristiği tüm durumlarda benzer davranış göstermiştir.
- Enerji boşaltma periyodunda, sıcak su tankından elde edilen sıcak su hacminin üzerindeki en büyük etkiye şebeke debisi sahiptir. Artan şebeke giriş debisiyle sıcak su tankından elde edilen sıcak su miktarı azalmaktadır. Artan her 5 l/dk şebeke debisi yaklaşık olarak elde edilen sıcak su hacmini 20 litre düşürmüştür. Tanktan en yüksek miktarda sıcak su elde etmek için şebeke giriş debisini düşük seviyede olması gerekmektedir.
- Artan manto giriş sıcaklığı ve manto debisi ile de tanktan elde edilen sıcak su miktarı artış eğilimi göstermektedir. Ancak manto giriş debisi ve sıcaklığının tanktan elde edilen sıcak su üzerindeki etkisi şebeke giriş debisine göre daha düşüktür.
- Sonuç olarak bir sıcak su tankından mümkün olan en yüksek sıcaklıkta ve miktarda sıcak su elde etmek için enerji yükleme periyodunda manto giriş debisi ve sıcaklığının yüksek olması ve şebeke giriş debisinin ise düşük olması gerekmektedir.

Teşekkürler

Bu çalışma TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek Programı kapsamında 217M993 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazar sağladığı destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunar.

Referanslar

- Acar, C. (2018). "A comprehensive evaluation of energy storage options for better sustainability." *International Journal of Energy Research* 0(0).
- Arslan, M. and A. A. Igci (2015). "Thermal performance of a vertical solar hot water storage tank with a mantle heat exchanger depending on the discharging operation parameters." *Solar Energy* 116: 184-204.
- Assari, M. R., H. Basirat Tabrizi and M. Savadkoho (2018). "Numerical and experimental study of inlet-outlet locations effect in horizontal storage tank of solar water heater." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 25: 181-190.
- Bouhal, T., S. Fertahi, Y. Agrouaz, T. El Rhafiki, T. Kousksou and A. Jamil (2017). "Numerical modeling and optimization of thermal stratification in solar hot water storage tanks for domestic applications: CFD study." *Solar Energy* 157: 441-455.
- Chandra, Y. P. and T. Matuska (2019). "Stratification analysis of domestic hot water storage tanks: A comprehensive review." *Energy and Buildings*.
- Dehghan, A. A. and A. Barzegar (2011). "Thermal performance behavior of a domestic hot water solar storage tank during consumption operation." *Energy Conversion and Management* 52(1): 468-476.
- Deng, J., S. Furbo, W. Kong and J. Fan (2018). "Thermal performance assessment and improvement of a solar domestic hot water tank with PCM in the mantle." *Energy and Buildings* 172: 10-21.
- Dincer, I. and M. A. Rosen (2011). *Thermal Energy Storage Systems and Applications*, Wiley and Sons, Ltd., Publication.
- Dragsted, J., S. Furbo, M. Dannemand and F. Bava (2017). "Thermal stratification built up in hot water tank with different inlet stratifiers." *Solar Energy* 147: 414-425.
- Erdemir, D. and N. Altuntop (2016). "Effect of thermal stratification on energy and exergy in vertical mantled heat exchanger." *International Journal of Exergy* 20(1): 105-121.

- Erdemir, D. and N. Altuntop (2016). "Improved thermal stratification with obstacles placed inside the vertical mantled hot water tanks." *Applied Thermal Engineering* 100: 20-29.
- Fan, J. and S. Furbo (2012). "Thermal stratification in a hot water tank established by heat loss from the tank." *Solar Energy* 86(11): 3460-3469.
- Fan, J., S. Furbo and H. Yue (2015). "Development of a Hot Water Tank Simulation Program with Improved Prediction of Thermal Stratification in the Tank." *Energy Procedia* 70: 193-202.
- Fertahi, S. e.-D. n., A. Jamil and A. Benbassou (2018). "Review on Solar Thermal Stratified Storage Tanks (STSST): Insight on stratification studies and efficiency indicators." *Solar Energy* 176: 126-145.
- Kenjo, L., C. Inard and D. Caccavelli (2007). "Experimental and numerical study of thermal stratification in a mantle tank of a solar domestic hot water system." *Applied Thermal Engineering* 27(11): 1986-1995.
- Kurşun, B. (2018). "Thermal stratification enhancement in cylindrical and rectangular hot water tanks with truncated cone and pyramid shaped insulation geometry." *Solar Energy* 169: 512-525.
- Kurşun, B. and K. Ökten (2016). "Sıcak Su Tanklarında Yalıtım Kalınlığının Isıl Katmanlaşmaya Etkisi." *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* 6(1): 105-115.
- Kurşun, B. and K. Ökten (2018). "Effect of rectangular hot water tank position and aspect ratio on thermal stratification enhancement." *Renewable Energy* 116: 639-646.
- Zachár, A. (2015). "Investigation of a new helical flow distributor design to extract thermal energy from hot water storage tanks." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 80: 844-857.



Sintering and Characterization of SiC Reinforced Ni Powders in Microwave Furnace

Ahmet Yönetken^{*1} , Ayhan Erol² 

¹Afyon Kocatepe University, Faculty of Engineering, Electrical Engineering, ANS campus, 03200, Afyonkarahisar, TURKEY

²Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Metallurgy and Materials Engineering, ANS campus, 03200, Afyonkarahisar, TURKEY

Başvuru/Received: 23/10/2018

Kabul / Accepted: 30/07/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 04/11/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Abstract

In this study, SiC reinforced nickel matrix composites, microwave at different temperatures It is produced by sintering in oven. Nickel deposition on SiC powders was achieved by using electroless nickel plating technique. It is sintered at temperatures between 500°C, 600 °C, 700°C, 800°C and 900°C under Ar atmosphere. XRD, SEM (Scanning Electron Microscope), pressure test and hardness measurements were used to characterize the properties of sintered samples in microwave furnace. The experimental results, maximum compressive strength (σ_{max}) and hardness (HV) were carried out at 800 °C. Microwave sintering of Ni-coated SiC powders without electric current can be a promising technique for producing ceramic-reinforced nickel composites.

Key Words

“Microwave sintering, Powder metallurgy, Composites, Nickel plating”

1. Introduction

Composite materials are being used with increasing speed in many advanced engineering applications (Yönetken 2018; Tang et al. 2003; Zang et al. 2005; Wu et al. 2014; Jarzabek et al. 2017). Powder Metallurgy is a more advantageous production technique compared to other production methods in terms of producing high-tech materials, high strength starting from powdered raw materials, less error, cheaper processes and providing physical and chemical properties of desired powders (Malecki and Micek-Ilnicka 2000; Söyler 2007). Electroless plated nickel plating has been widely used in many areas. Because of electrolysis plating technique, non-homogenous coating is achieved. High hardness, abrasion resistance and corrosion resistance high performance products were obtained in Ni coated composite samples. Electroplating Ni coating is a simple process with low cost. It can also be used in the surface coating of particles with a complex shape. This feature has been preferred in the industry coating method. (Zhang et al., 2015).

Ceramic-Metal composites reinforced with silicon carbide (SiC) are a well-known and commonly used material in applications. However, SiC is susceptible to SiO₂ conversion very quickly in the oxygen environment due to its poor condensation and high decomposition. Due to the high cost of produced samples, its commercial success is limited (Mandal et al., 2001). Microwave furnaces (MWs) are electromagnetic waves operating at frequencies ranging from 300 MHz to 300 GHz, and wave frequencies ranging from a few cm to several mm. Unlike conventional heating, the penetration of microwave signals into materials causes a volumetric distributed heat source. As a result, the microwave sintering method enables faster heating of both small and large samples compared to conventional heating (Chatterjee et al., 1998).

Silicon carbide, which has many good properties such as good thermal conductivity, electrical conductivity, chemical stability, high mechanical strength and low friction, can be used as both structured materials and functional materials (Chen, et al., 2003).

SiC-containing ceramic metal composites have higher thermal properties and chemical stability (Somiya et al., 2003).

SiC powder interacts with microwave frequency radiation at ambient temperature. The energy of the electromagnetic field changes into heat energy (Horatiu et al., 2007).

In this study, the production of SiC carbide doped ceramic-metal composites and production of the composite was performed using microwave sintering technique. Composites produced by applying physical and mechanical tests to the produced samples were characterized.

2. Preparation of Sample

2.1 Material

In this study, two different aspects were used. Firstly, SiC powders and Ni powders were mixed in a constant speed mixer for 24 hours to ensure a homogeneous mixture. silicon carbide (SiC), ceramic powder and metal as Nickel (Ni) powder. SiC powders of 10 µm and 99.5% purity and Ni powders of 3 µm and 99.5% purity were used, both of which were obtained from Johnson Matthey Materials Technology. The aim of this study is to reinforce SiC ceramic powders with Ni. Pure nickel was obtained from which Ni powders can be added directly in the mixture or can be obtained by coating with nickel chloride (NiCl₂.6H₂O) which is used in the electroplating nickel plating bath (Sverdel et al., 1995) (Changhong, et al., 1997).

2.2 Method

In the experimental study, samples were prepared by two different methods. In the first method, the homogeneous mixture obtained by mixing SiC-Ni powders for a 24 hour period was formed as cold under 300 bar in the uniaxial hydraulic press and made ready for sintering. In the second method, silicon carbide powders were deposited on Ni SiC powders using electroless nickel plating technique. Then, it was shaped under uniaxial hydraulic press under pressure of 300 bar. The shaped raw samples were sintered in the industrial microwave sintering furnace for one hour in the temperature range of 500-900°C under an atmosphere of argon gas. Sintered samples were sanded and polished for mechanical and metallographic analysis. 20% SiC powders were used by weight, Nickel Chloride, Ammonia, Hydrazine hydrate and pure water were used in the Ni-bath without electricity. The content of the coating bath is given in Table 1.

Table 1. The chemicals of Nickel plating bath and their ratios

Chemicals	Raito
Silicon Carbide (SiC)	6
Nickel Chloride (NiCl ₂ .6H ₂ O)	96
Hydrazine Hydrate (N ₂ H ₄ .H ₂ O)	20%
Distiled Water	80%
Temperature (°C)	90-95°C
pH Value	9-10

Nickel plated silicon carbide powders were purified from chemicals by washing with pure water after plating and made ready for subsequent processing. The experiment flowchart is shown in Figure 1

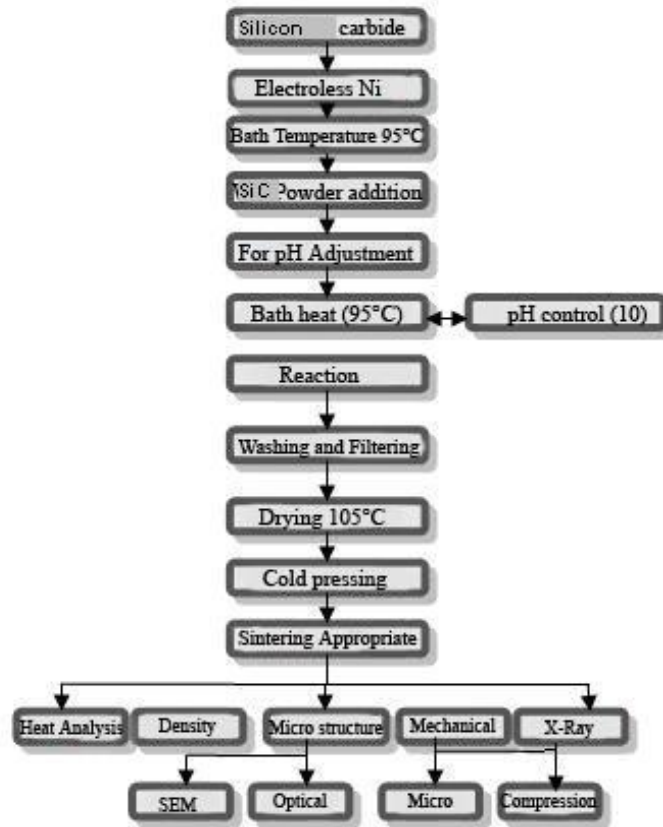


Figure 1. Experimental study flow diagram

In order to use sintering, Industrial sintering furnace was used. Furnace Phoenix brand 2450MHz 1500W 230V has label values. Sintering furnaces were produced in microwave sintering furnace at temperatures of 500-900 ° C for 1 hour. SEM-EDX analyzes were performed after sanding and polishing the sintered samples. SEM photographs were taken with LEO143OVP Röntech device. In addition, a Shimadzu-AG / IS 100kN tester was used to measure the compressive strength of the samples.

Micro hardness of the samples was measured with the Shimadzu HMV 2 L micro hardness tester. The hardness values were determined by taking the average of the hardness values taken from 10 different areas for each sample in the micro hardness measurements applied to the samples.

3. Experimental Findings

In this study, the samples prepared and shaped by two different methods were sintered in the industrial microwave sintering furnace at temperatures ranging from 500°C to 900°C. The samples were tested by making them ready for physical, mechanical and metallographic analyzes. In the study, the samples prepared and shaped (pressed) through two different methods were sintered at temperatures ranging from 500°C to 900°C in microwave furnace and made ready for physical, mechanical and metallographic analyses.

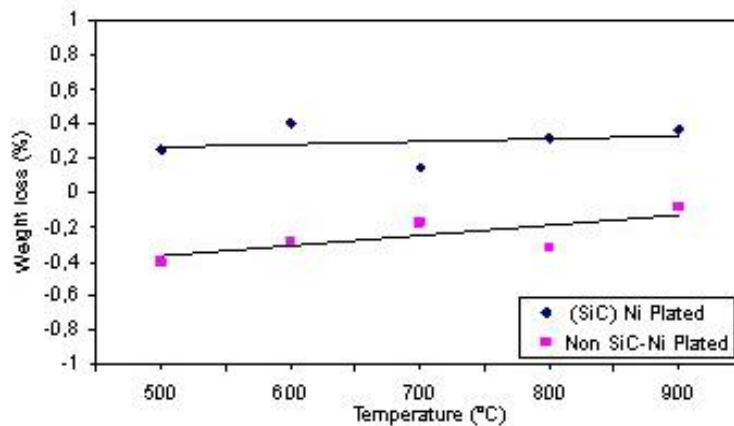


Figure 2. Percent weight change in the sintered samples depending on the temperature

Density-temperature change graphic is shown in Figure 3. The pre-sintering raw density of the plated sample was estimated to be 4.21gr/cm³. The highest post-sintering density was achieved at 700°C as 4.57gr/cm³. The highest post-sintering density of the non-plated sample was obtained at 700°C. The pre-sintering density of the non-plated density was estimated to be 4.85gr/cm³. The highest post-sintering density was observed to be 5.34gr/cm³ at 700°C.

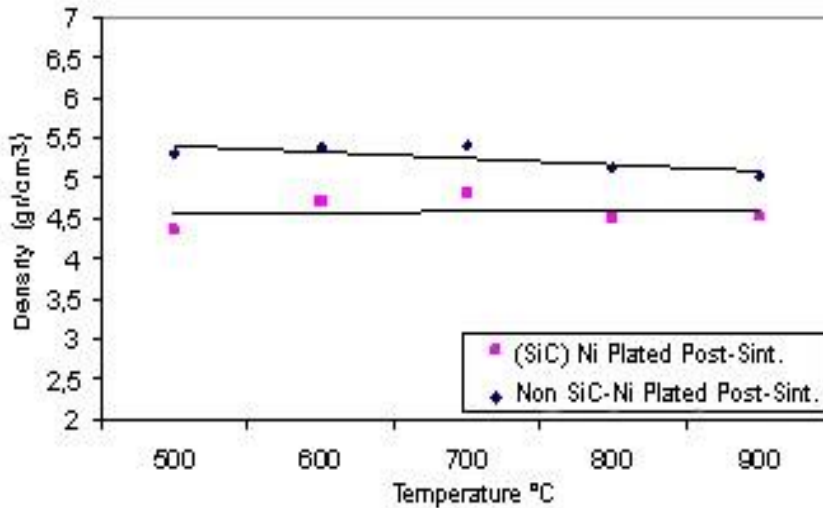


Figure 3. The graphic of density change depending on the temperature

3.1 Analysis of the Physical Properties of the Samples

In this study, Two different methods were used to produce SiC reinforced composite samples in composite production. pre and post sintering density of the samples were determined. Figure 2 is a graph showing the weight change of samples produced by a mixture of sintered samples and powders by coating depending on the temperature. Ni weight loss occurred in the samples produced by coating and weight increase occurred in the uncoated sample. This showed that uncoated samples were more easily oxidized and that sintering was not good despite the use of argon atmosphere.

3.2 Analysis of the Mechanical Properties of the Samples

The compression strength and microhardness of the ceramic-metal composite material produced by powder mixing and non-electric Ni coating methods were measured. The relationship between the sintering temperatures and compression strength values of the produced samples is given in Figure 5.

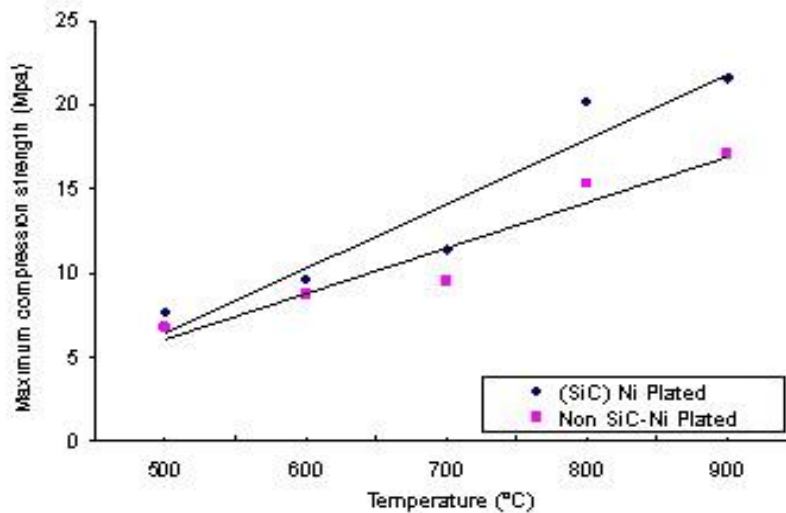


Figure 5. Compression strength test applied to the samples sintered at different temperatures

The microhardness-temperature change graph of the samples produced by mixing the powders and using the electro-current Ni coating methods is given in Figure 6. Micro hardness values of the produced composite samples, SiC powders were coated with Ni coating method without electric current. Produced samples were made using microwave sintering furnace at temperatures between 500-900 ° C. Samples produced using SiC-Ni powders and the Electroless Ni coating method were subjected to mechanical tests after sintering at 500-900 ° C.

The highest micro hardness value of the composite samples produced by using the Ni-Finite method without electric current was measured as 136HV at 900 ° C. Microhardness of samples produced by using electroless Ni plating method gave higher results than mixing of SiC-Ni powders. The highest micro hardness of the samples produced by using electroless Ni plating method was measured as 148HV in sintered composite samples at 800 ° C.

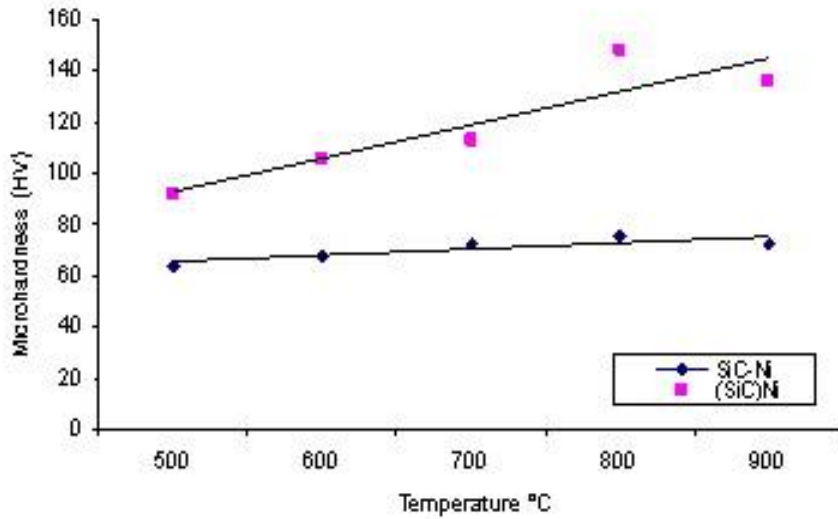


Figure 6. Microhardness - Temperatures curve of different product method.

3.3 Metallographic Analysis

Specimens after the sintering of SiC-Ni powders and the samples produced by using electroless Ni plating method, surface polishing processes were performed. After the electroless nickel plating process, it was examined by applying SEM EDX analysis whether Ni coating was applied to the powders. Fig. 7 shows the enlarged SEM images of ceramic-metal composite samples obtained from non-electric Ni-coated (SiC) powders and sintered at 800 ° C at different scales. In Figures 7 a and b, it was observed that the particles were better bonded to each other in the Ni (SiC) composite sample and the particles were larger. In the SEM image, there were pores with homogenous distribution between the grains.

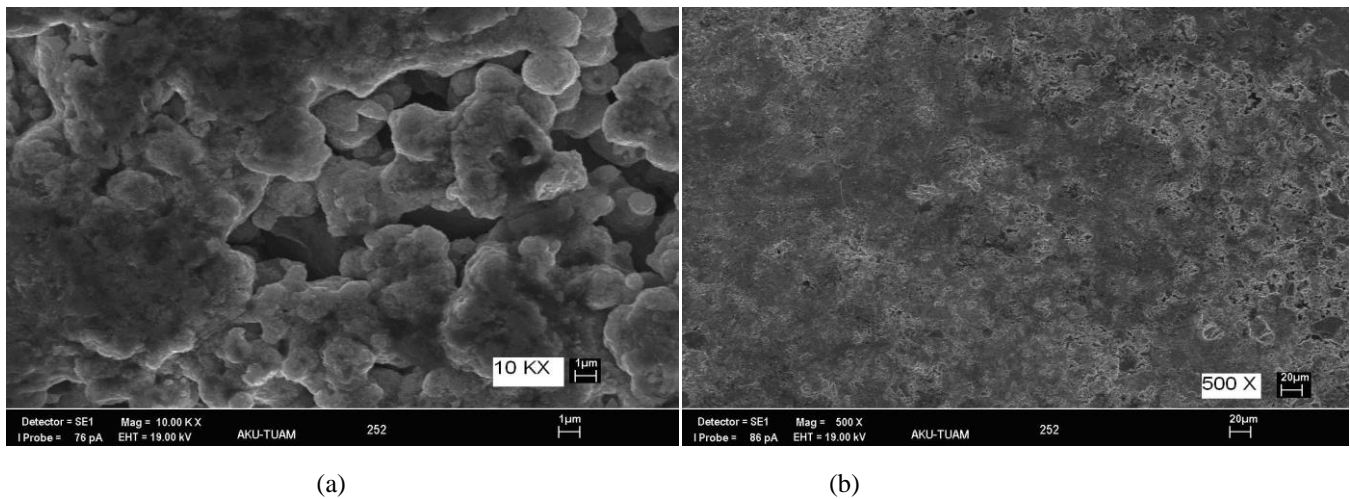


Figure 7. SEM view of (SiC)Ni composite at 800°C

The SEM images of the composite samples produced by sintering at 900 ° C by mixing the SiC and Ni powders are given in Figure 8a-b. Figure 8a shows the SEM image of the WC-Ni composite at 500X magnification. In Figure 8b, the 10kX magnified SiC particle is clearly visible..

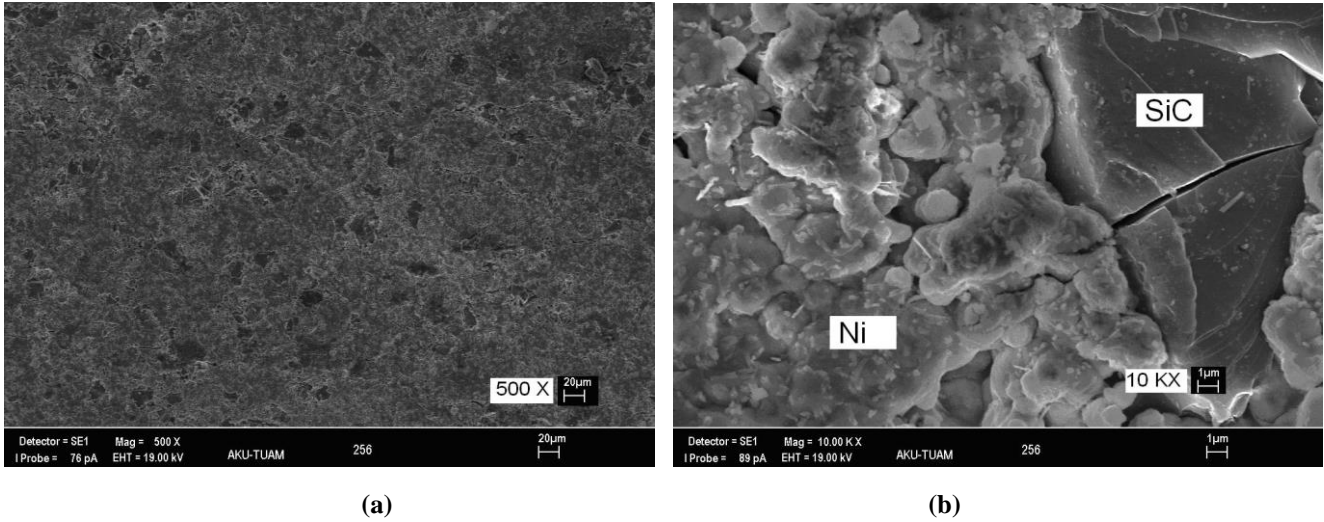


Figure 8. SEM view of SiC-Ni composite at 900°C

3.4 XRD Analysis

In Figure 9, shows the peaks of SiC and Ni phases. In the sintered composite sample (SiC) at the microwave oven at 800 ° C the XRD graph of the Ni composite is given. Since the sintering takes place at low temperature, no different phase is formed.

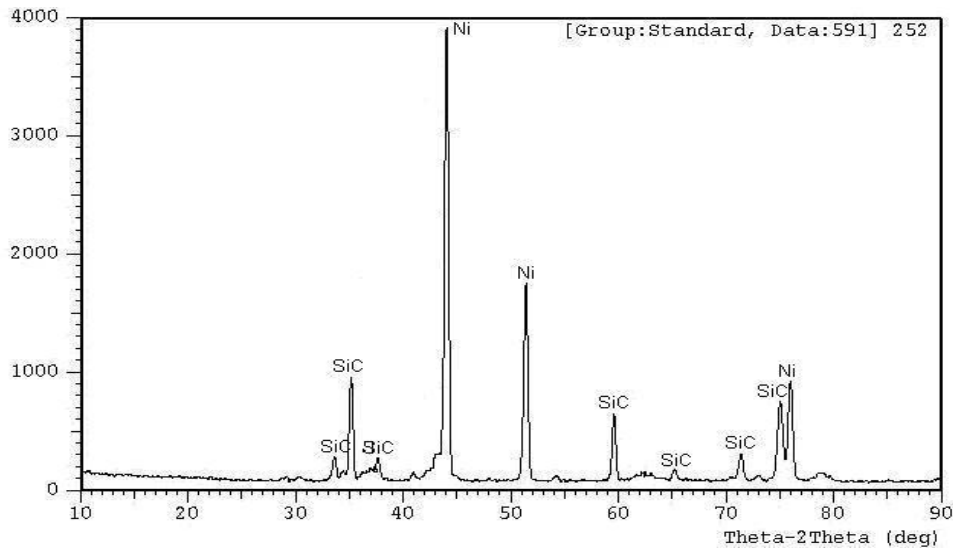


Figure 9. The XRD graphic of Nickel Plated SiC composite Sintered in Microwave Furnace at 800°C

4. Results & Discussion

As a result of the mechanical and metallographic tests applied to SiC-Ni composite samples, the following findings were obtained.

- In samples sintered at 900 ° C, the average hardness value of the Ni-coated SiC after sintering was measured as 89.85HV.
- The highest compressive strength was obtained as 22.24MPa at 900 ° C (Fig. 5).
- The highest density of composite samples produced in sintered Ni coated SiC powders at different temperatures was 4.57gr / cm³ at 700 ° C (See Figure 1). In the coated samples, the pre-sintering density was calculated to be 4.21 g / cm³.
- The density before sintering in uncoated samples was calculated as 4.85gr / cm³. The highest density after sintering was 5.34 g/cm³ at 700 ° C.
- In the composite samples produced by using electroless Ni plating method, the highest micro hardness was measured as 148HV at 800 ° C. The highest microhardness values of the samples produced by mixing the powders were measured as 37.8HV at 700 ° C.
- It has been determined that composite samples produced by using electroless Ni coating method have more homogeneous microstructures and less pores.

It has also been found that the mechanical properties of the coated samples produced using the electroplating Ni coating method are higher than those of the uncoated samples.

It has been concluded that SiC powders give a positive result to Ni-coating and microwave sintering method is more advantageous than classical sintering technique because of temperature, duration and low energy consumption.

Acknowledgements

We would like to extend our thanks to the Scientific and Technological Research Council of Turkey (**TUBITAK**) due to its contributions to this study with project no. 106T744.

Referanslar

Chatterjee A., Tanmay B., and K. G. Ayappa, (1998) 'Analysis of Microwave Sintering of Ceramics' Materials, Interfaces, and Electrochemical Phenomena October 1998 Vol. 44, No. 10

Chen Y., Cao M., Xu Q., Zhu J., (2003) 'Electroless nickel plating on silicon carbide nanoparticles' Surface and Coatings Technology 172 , 90-94

Changhong Dai and Xianpeng Zhang , (1997) "Microwave Synthesis of Ultrafine Silicon Carbide Whiskers" J.Am.Ceram Soc. 80 [5] 1274-1276

Horatiu Niciu and others (2007). 'The SiC-SiO₂-Al₂O₃-Al₆Si₂O₁₃ Ceramic Composites Microwave Heating' Ceex 2007 Conference

Jarżabek, D. M., Milczarek, M., Wojciechowski, T., Dziekoński, C., Chmielewski, M., 2017. The effect of metal coatings on the interfacial bonding strength of ceramics to copper in sintered Cu-SiC composites, *Ceramics International*, 43, 5283-5291

Kidder, T. (1981). *The soul of a new machine*. Boston, MA: Little, Brown & Company.

Malecki, A. And Micek-Ilnicka, A., 2000. Electroless nickel plating from acid bath, *Surface and Coatings Technology*, 72-77.

Mandal S , Seal A, Dalui, S K., Dey, A K., Ghatak S and Mukhopadhyay A K., (2001) "Mechanical characteristics of microwave sintered silicon carbide" *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 24, No. 2, April 2001, pp. 121-124.

Somiya, S.; Inomata, Y., *Silicon Carbide Ceramics*, Ed. Elsevier Applied Science, 1991

Söyler, M., 2007. Toz metalurjisi ve uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Tasarım ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze-Kocaeli.

Sverdel V. V. , Shatov A. V. , Yurchuk N. A. and Bakun O. V. , (1995) 'Finely disperse cemented carbides WC-Ni I. Mechanical properties', *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Volume 33, Numbers 1-2 / January,

Tang, F., Anderson, I.E., Biner, S.B., 2003. Microstructures and mechanical properties of pure Al matrix composites reinforced by Al-Cu-Fe alloy particles, *Materials Science and Engineering A*, 363, 20-29.

Yönetken, A., 2017. Production and investigation of ceramic metal composite from electroless Ni plated AlN and Al powders, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 6 (10), 21-26.

Wu, G., Zhang Q., Yanga, X., Huang Z. & Sha, W., 2014. Effects of particle/matrix interface and strengthening mechanisms on the mechanical properties of metal matrix composites, *Composite Interfaces*, 21(5) , 415-429.

Zhang Q., Wu, M., and Z. Wen, (2005) 'Electroless nickel plating on hollow glass microspheres' *Surface & Coatings Technology* 192 213- 219



Opak Çömlek Sırına Bazalt İlavesinin Araştırılması

Investigation of Basalt Addition to Opaque Pottery Glaze

Elif Eren Gültekin¹

¹ Selçuk Üniversitesi, 42130 Konya, TÜRKİYE

Başvuru / Received: 11/11/2018

Kabul / Accepted: 05/03/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 04/11/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Bazalt yeryüzünde en yaygın bulunan kayalardan birisidir. Bu çalışmada, çömlek sırlarına bazalt ilavesi yapılmıştır. Opak sırları üretmek için Tatların-Nevşehir (Türkiye) yöresinin bazaltı kullanılmıştır. Sırlar, farklı miktarlarda bazalt ilavesiyle hazırlanmıştır. 1000 °C’de pişirim sonrasında en koyu renk, ağırlıkça %60 ilaveli opak sırda ölçülmüştür. Faz gelişimini belirlemek için X-ışını difraksiyonu (XRD) ve sırların mikroyapısal karakterizasyonu için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Renklendirme amacıyla opak sıra ilave edilen bazalt, ithal edilen zirkon hammaddesi kullanılarak hazırlanan opak sır miktarının da toplam sır bileşimde azalmasını sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler

“Bazalt, çömlek, opak sır”

Abstract

Basalt is one of wide-spread rocks. In this paper, basalt addition is implemented to opaque pottery glaze. Basalt from the locality Tatların-Nevşehir (Turkey) was used for producing the opaque glazes. Glazes were prepared with the addition of different amounts basalt contents. After firing at 1000 °C, the darkest colour was achieved with 60 wt. % basalt added opaque glaze. X-ray diffraction (XRD) was used to determine phase development and scanning electron microscopy (SEM) was used to microstructural characterization of the glazes. Basalt, which was added to the opaque glazes for coloring purpose, decreased the amount of opaque glaze prepared using the imported zircon raw material in the total glaze composition.

Key Words

“Basalt, pottery, opaque glaze”

1. Giriş

Bazalt, tüm dünyada doğal olarak oluşmuş, yüksek basınç direncine ve aşınma dayanımına sahip volkanik bir kayadır. Bazalt kayalarının temel özellikleri dikkate alındığında bazalt bazlı malzemeler tehlikeli değildir ve çevresel etkiler açısından da zararsızdır. Bazaltın genel uygulamaları, porselen, majolika, karo, sağlık gereçleri, sanatsal seramik, elektro-porselen, takviye malzemesi üretiminde olup, bazaltın endüstrideki ilk kullanımı, 2. Dünya Savaşı'ndan önce Fransız şirketi "Generale du Basalte" tarafından bazalt kayacının ergitilmesiyle demir bakımından zengin olan cam malzemenin üretilmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir (Andrić vd., 2012; Cocić vd., 2010).

Geçmiş yıllarda, asidik ve nötr magmatik kayaların, sır bileşeni olarak kullanıma yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ancak kristallenme yeteneklerinin fazla olması sebebiyle bazik volkanik kayaların sırda kullanımı üzerine yapılan çalışmalar, asidik ve nötr olan kayaların sırda kullanımına yönelik çalışmalara göre daha sonra başlamıştır. Dvorkin ve Galushko (1969), sır bileşimine ağırlıkça %45,5-77,2 arasında bazalt ilave ederek hazırladıkları sırları preslenmiş kil bünyelere uygulamışlardır. 1170-1200°C'de pişirdikleri ürünlerde sır-bünye uyumunu elde etmişler ve bu sırların, mat görünümüli siyah, kahverengi ve kiraz renkli, yüksek elastisite modülüne, dinamik mukavemete, asit ve alkali dayanımına sahip olduğunu belirlemişlerdir. Dvorkin ve Galushko (1971) diğer çalışmalarında bazalt miktarı ağırlıkça %55-100 arasında değişen fritler hazırlamışlardır. Bu fritlerle hazırlanan sırlar 1050-1100°C'lerde pişebilmekte, pişirim koşullarına bağlı olarak kiraz-kahve tonlarında, yüksek opaklıkta ve yeterli parlaklıktadır. Dalakishvili (1975) ise çalışmasında ahşap görünümüli mat bir yüzey elde etmek için sır bileşimlerinde Chiatur-Gürcistan bazaltın kullanımını araştırmıştır. Deneysel çalışmalarda, reçetede ağırlıkça %40-50 bazalt kullanımıyla koyu gri, %80-90 bazalt kullanılarak donuk siyah mat sırlar elde edilmiştir. Sırların erime noktası 1300-1320°C'dir. İncelemeler, porselen ürünlerin kaplanması için bazalt bazlı sır bileşimlerinin kullanılmasının olumlu sonuçlar verdiğini, elastik olup çatlama anı sıcaklık düşüşlerine dayandıklarını göstermiştir. Yüksek sıcaklık seladon sırlarında bazalt, %10'a kadar kullanılarak sırlarda istenilen spesifik mavi renk için gerekli olan demir oksiti sağlamıştır (Matt's Ceramic Action, 2017). Çetin ve Kılınç (2004), bazalt tufünü ağırlıkça %10-15 oranında %80-85 oranında şeffaf ve opak firite ekleyerek duvar karo sırı hazırlamışlardır ve açık sarıdan koyu kahveye değişen geniş bir renk yelpazesi elde etmişlerdir. Çetin (2005), ayrıca bazalt tüfleri karışımının eritici katkılarıyla fritleştirilerek, seramik yer ve duvar karoları sırlarında kullanımını da araştırmıştır. Prstić vd. (2007) ise frit bileşimlerinde ağırlıkça %24,5-60 oranlarında bazalt kullanarak hazırladıkları kompozisyonları 1300-1350°C sıcaklıkta 1 saat tutarak ergitmişler, bu fritlerle hazırladıkları sırları seramik karolara uygulayarak 980°C'de pişirmişlerdir. Elde ettikleri renkler açıktan koyu kreme, koyu sarıdan kestane rengine değişmekte olup tüm sırlar opaktır. Andrić vd.'nin (2012) opak firite ağırlıkça %25-60 Sırbistan bazaltı ilavesi ile hazırlamış oldukları karo sırlarında elde ettiği renkler aynıdır ve sırlar opaktır. Reben vd. (2016) de çalışmalarında, geri dönüşüm malzemesi olarak katot ışını tüplerinin atık camlarını bazalt, kaolen ve diğer ilavelerle birlikte kullanarak sır bileşimleri hazırlanmıştır. Bu sırlar, hızlı pişirim seramik karolarının mekanik ve kimyasal özelliklerini geliştirmek amacıyla kristallendirilebilmektedir. Bazalt ilaveli sırların yüksek aşınma direnci sağladığı tespit edilmiştir.

Nevşehir İli'nin jeolojik yapısını oluşturan kayalardan birisi olan bazalt, literatürde belirtilen volkanik cam çeşidinden birisidir (Gan vd., 2016). Nevşehir Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, ÇED, İzin ve Denetimden sorumlu Şube Müdürlüğü (2013) verilerine göre Nevşehir İli'nde toplam 5 firma 936.376 ton bazalt çıkartmıştır. 2015 yılı verilerinde ise, 4 firmanın çıkardığı bazalt miktarı 688.457,30 ton olarak belirtilmiştir (Nevşehir Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2016). Çıkarılan bazalt kayacı, kesme taş ve çakıl taşı olarak işlenmektedir. Çalışmada, Nevşehir il sınırları içinde bulunan bazaltın, Avanos çömlükleri üzerinde opak sır renklendiricisi olarak kullanımı incelenmiştir.

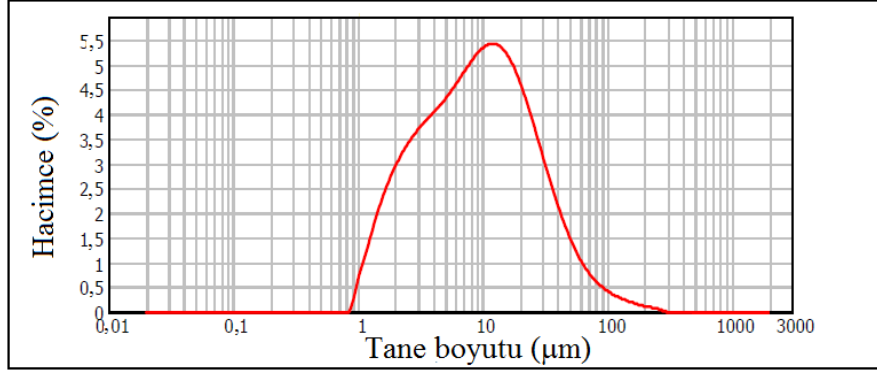
2. Materyal ve Metot

Deneysel Nev Beton Bazalt Tesisi'nden temin edilen Tatların-Nevşehir (Türkiye) yöresinin bazaltı (Şekil 1) kullanılmış olup bu kayaç, kestamit bilyalı değirmende 1 saat sulu olarak öğütülerek 100 µm'luk elekten elenmiştir. Elenen bazaltın tane boyut dağılımı Malvern Mastersizer Hydro 2000 G tane boyut cihazı ile belirlenmiştir (Şekil 2). Ortalama tane boyutu 9,096 µm olarak ölçülmüştür. Kurutulmuş öğütülmüş bazalt, %0, %5, %10, %15, %20, %40, %60 oranlarında Ava Seramik-Sır Üretim Merkezi'nden temin edilen opak sıra ilave edilerek karışımlara %100 oranında su ilavesi yapılmıştır. Önceden Refsan marka Kaleo h-500 model fırında 1000°C'de pişirilmiş döküm çamurundan plakalara fırçayla uygulanan sır kompozisyonları, 1000°C'de Refsan marka Kaleo-27 model fırında pişirilmiştir.

Bazalt kayacının kimyasal analizi, X-ışınları floresans spektrometresi (XRF-Bruker Tiger S8) ile Tablo 1'de belirtildiği gibi tespit edilmiştir (Eren Gültekin, 2018). Termogravimetrik ve diferansiyel termal analiz (TG-DTA), Toledo Metter TGA/DSC 2 Star System termal analiz cihazında argon atmosferinde 10 °C/dk. ısıtma hızıyla 1000 °C'ye çıkılarak gerçekleştirilmiştir. Ham ile TG-DTA cihazında 1000 °C'ye çıkarılan 14,985 mg bazaltın ve hazırlanan (%0, 20, 40, 60 bazalt ilaveli) sırların faz analizi ise X-ışını kırınımı (XRD, Rigaku Miniflex 600) cihazıyla 2°/dk. tarama hızı ve 2θ, 5°'den 70°'ye tarama ile 40 kV ve 15 mA'da gerçekleştirilmiştir. Sırlı numunelerin renk analizinde Minolta CM-3600d renk ölçüm cihazı kullanılarak L*, a*, b* değerleri belirlenmiştir. Fazların mikroyapıdaki gelişimi ise taramalı elektron mikroskobu (SEM, Zeiss EVO 50 EP) ile %60 bazalt içeren opak sırlı numune incelenerek tespit edilmiştir.



Şekil 1. Deneysel olarak kullanılan bazalt kayacı.



Şekil 2. Öğütülmüş bazaltın tane boyut dağılımı.

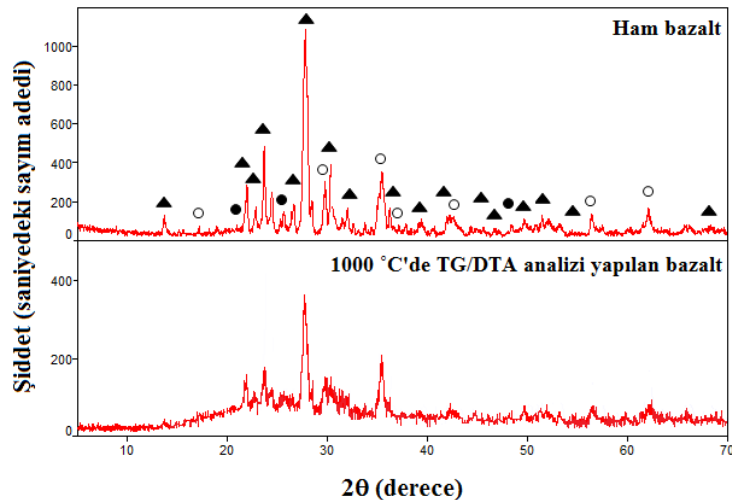
Tablo 1. Bazalt kayacının kimyasal analizi (kütlece %).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	A.Z.*
50,66	18,38	9,74	7,45	4,67	4,55	2,16	1,17	0,55	0,16	0,53

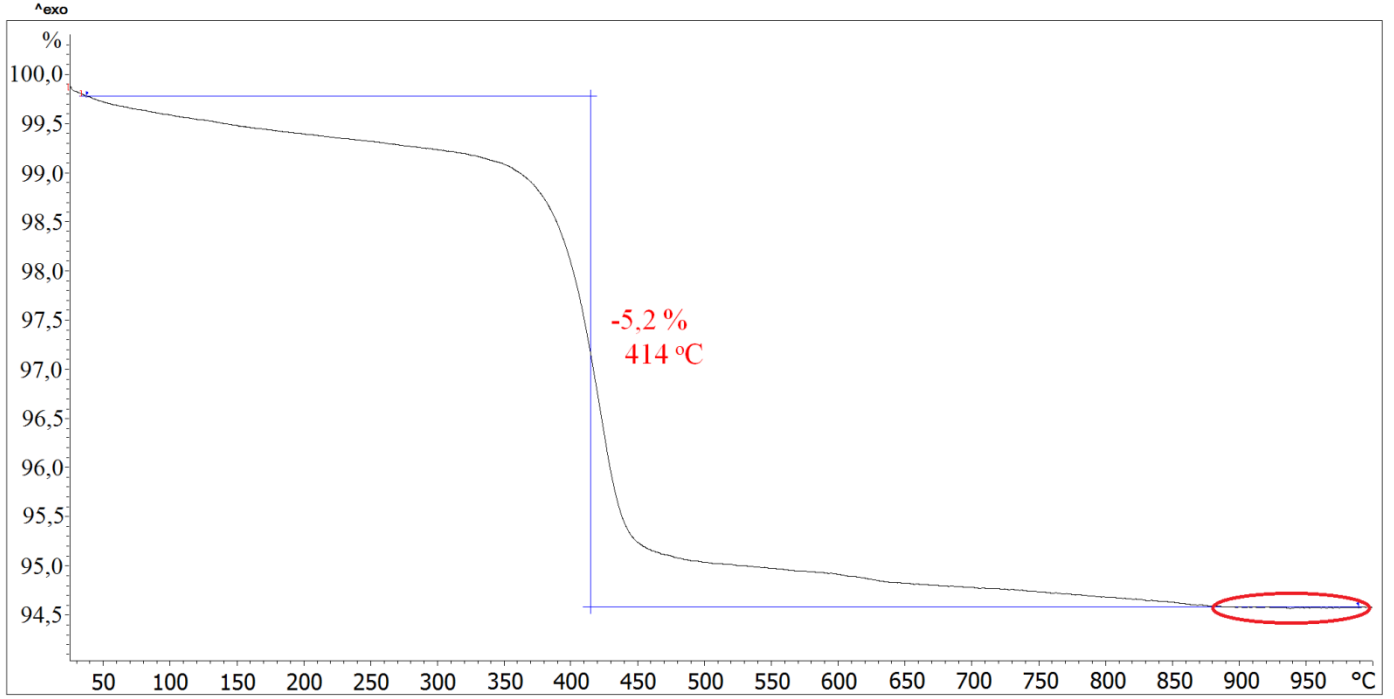
A.Z.*: Ateş Zaiyatı

3. Sonuçlar ve Tartışma

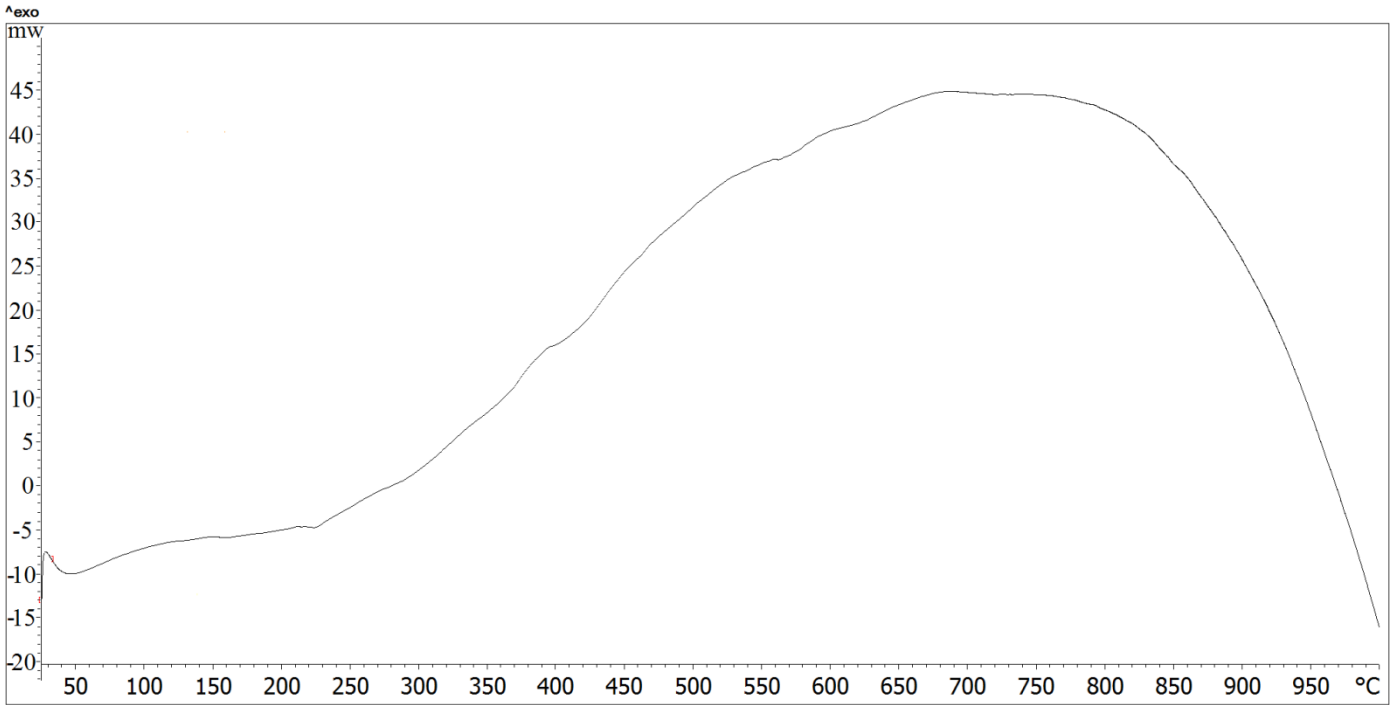
Tablo 1'de belirtildiği gibi bazalt kütlece %9,74 Fe₂O₃ içermektedir ve bu miktarın içeriğinde, magnetit fazı tespit edilmiştir (Şekil 3). Dolayısıyla basalt kayacında siyah rengi verme potansiyeli bulunan magnetit fazı bulunmaktadır. Bazaltta bulunan diğer fazlar ise anortit ve kuvars fazlarıdır. Yapılan TG analizinde bazaltta 414°C'de %5,42'lik bir kütle kaybı tespit edilmiştir (Şekil 4). Bu kütle kaybı hem düşük bir miktardır, hem de sıvı ergimesi için gereken sıcaklıktan düşük bir sıcaklıkta gerçekleşmiştir. Ayrıca sıvı ergime sıcaklıklarında eğride herhangi bir kütle kaybı olmadığı görülmektedir (kırmızı oval). Bazalta yapılan DTA analizinde de herhangi bir kristalizasyon piki tespit edilmemiştir (Şekil 5). Bazalt sıcaklığa tabi tutulduğunda yapısını korumaktadır. TG-DTA analizinde kullanılan bazaltın XRD grafiğinde, ham bazalt ile içerdikleri fazlarının aynı olması, DTA analizini doğrulamaktadır. Kullanılan numunenin miktarının çok az olması sebebiyle sadece pik şiddetlerinin ham bazaltından düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Ham ve 1000 °C'ye çıkarılan bazaltın XRD analizi (Anortit: ▲, Magnetit:○, Kuvars:●).

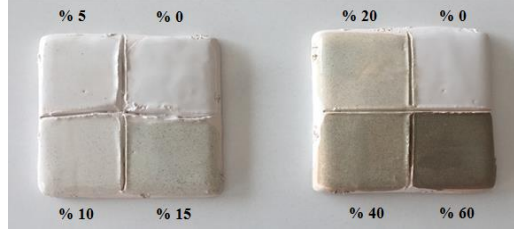


Şekil 4. Bazaltın TG analizi.

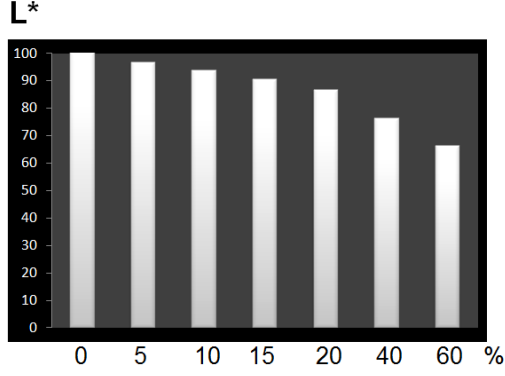


Şekil 5. Bazaltın DTA analizi.

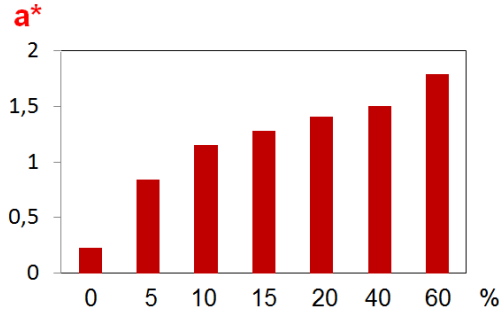
Opak sırlara ilave edilen bazalt miktarı arttıkça Şekil 6'da görüldüğü gibi renkler koyulaşmaktadır. Renk değişimi %20 bazalt ilavesinden sonra belirgin hale gelmektedir. L* değeri, %60 oranında bazalt ilavesinin yapıldığı opak sırlı numunede, diğer sırlara kıyasla en düşük değerde (66,21) ölçülmüştür (Şekil 7). a* değeri ise bazalt ilavesiyle 0,23'ten (%0 bazalt içeren) 1,79'a (%60 bazalt içeren) yükselmiştir (Şekil 8). b* değerinde de bazalt ilavesiyle bir artış söz konusudur (Şekil 9). En yüksek b* değeri %60 bazalt içeren opak sırlı numune için 14,74 olarak ölçülmüştür.



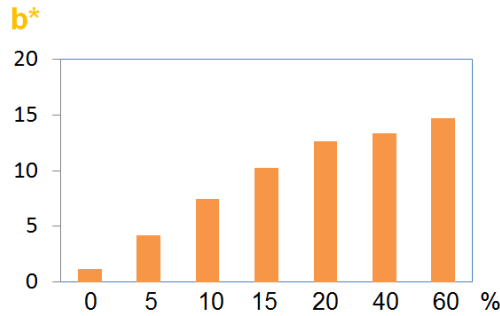
Şekil 6. Bazalt ilavesi ile opak sırların renk değişimi.



Şekil 7. Bazalt ilavesi ile opak sırların L* değerlerinin değişimi.

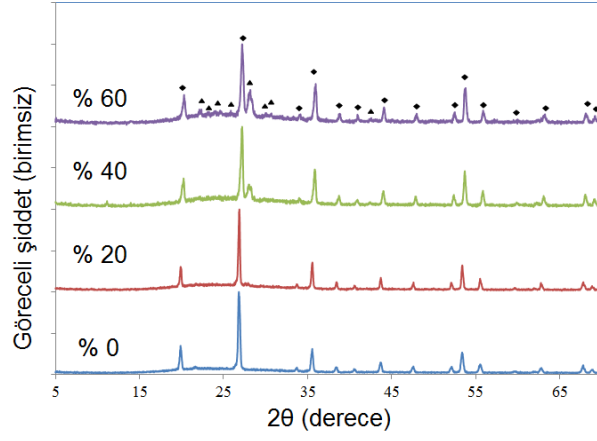


Şekil 8. Bazalt ilavesi ile opak sırların a* değerlerinin değişimi.

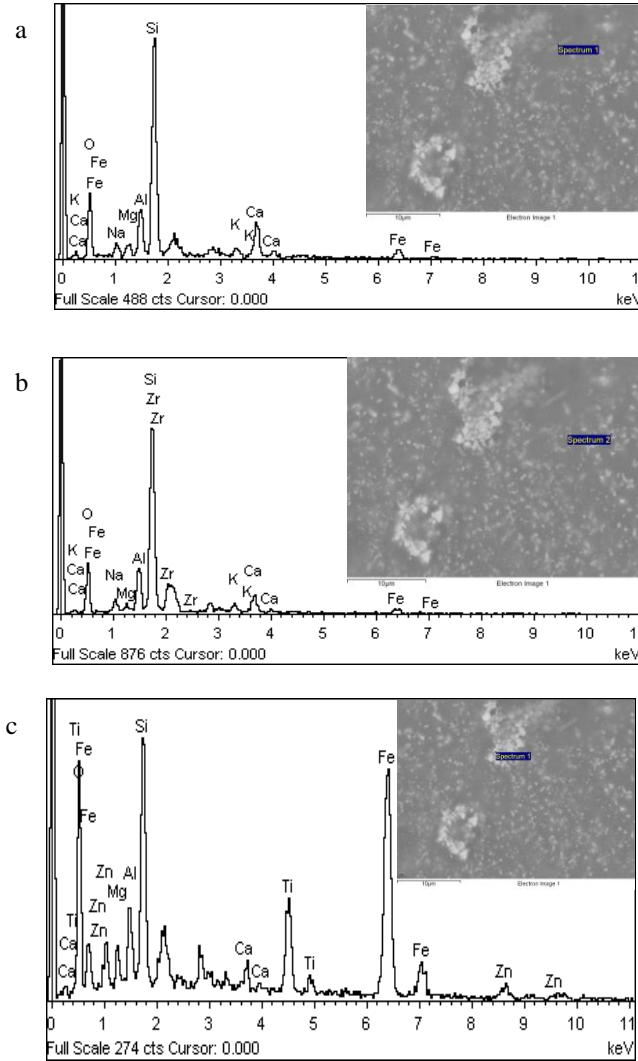


Şekil 9. Bazalt ilavesi ile opak sırların b* değerlerinin değişimi.

Kromatik koordinatlar seramik sır ve bünyelerinin renklerini kıyaslamada sıklıkla kullanılmaktadır (Aydın & Kara, 2010; Gungor vd., 2018; Bayer Öztürk & Eren Gültekin, 2014; Yalçın Yastı, 2004). Renk değişimi %20 bazalt ilavesinden sonra belirgin hale geldiği için %0, 20, 40 ve 60 bazaltlı opak sırların faz analizi yapılmıştır (Şekil 10). Standart opak sırda (%0 bazalt) ve tüm bazalt ilaveli numunelerde, zirkon fazı tespit edilmekle birlikte ilave edilen bazalt miktarına bağlı olarak anortit fazının da oluştuğu tespit edilmiştir. Anortit fazının en yüksek pik şiddeti %60 bazalt içeren opak sırda görülmektedir. Bu nedenle %60 bazalt içeren opak sırlı numunenin mikroyapısı taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Numunenin SEM-EDX (Enerji saçılımlı X-ışını) sonuçlarına göre, Şekil 11.a'da iğnesel anortit kristali tespit edilmiştir. Tunali & Selli'nin (2014) ve Tunali vd.'nin (2015) çalışmalarında da anortitin sırda iğnesel şekilli olarak kristallendiği belirtilmiştir. XRD cihazı ile tespit edilen diğer bir faz olan zirkon ise Şekil 11.b'de görülmektedir. Şekil 11.c'deki bölgeden alınan EDX sonuçlarına göre ise mikroyapı kütlece %24,43 SiO₂, %7,11 Al₂O₃, %1,48 CaO, %4,74 ZnO, %12,05 TiO₂, %4,07 MgO ve %46,12 Fe₂O₃ içermektedir. XRD ile tespit edilemese de mikroyapıda camsız faz içinde Fe₂O₃ kristalleri bulunmaktadır.



Şekil 10. Bazalt ilavesi yapılan opak sırların XRD analizleri (Anortit: ▲ , Zirkon: ◆).



Şekil 11. %60 bazalt ilave edilen opak sırda EDX analizleri:(a) anortit; (b) zirkon; (c) magnetit kristallerini içeren bölgeler.

4. Genel Sonuçlar

Yapılan çalışmada, bazaltın değişik oranlarda opak çömlek sıraına ilave edilmesiyle elde edilen renk oluşumu incelenmiştir. Bazaltın içerdiği Fe_2O_3 nedeniyle standarda (%0 bazalt) göre tüm sırların L^* değerinde bir düşüş görülmüştür. L^* değerindeki en fazla azalma standart opak sıra göre %35,91'lik bir azalma ile %60 oranında bazalt ilavesinin yapıldığı sırda gerçekleşmiş ve 66,21 L^* değerine en fazla miktarda bazalt (%60) içeren opak sır numunesinde ulaşılmıştır. Numunelerde oluşan fazlar incelendiğinde, tüm numunelerin kristal faz olarak zirkon içerdiği, bazalt ilavesi ile de kayacın ana fazı olan anortit kristallerinin oluşmaya başladığı tespit edilmiştir. Sonuçta, doğal bir pigment olarak bazalt ilavesi ile opak çömlek sırlarını renklendirmek

mümkündür. Ayrıca, opak sırda bazalt kullanımı ithal edilen zirkon hammaddesi kullanılarak hazırlanan opak sır miktarının da toplam sır bileşiminde azalmasını sağlamıştır.

Teşekkür

Desteklerinden dolayı Tübitak Başlangıç Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı 217M092 No'lu Proje'ye, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Seramik ve Cam Bölümü'ne (Nevşehir-Türkiye), Eskişehir Teknik Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'ne (Eskişehir-Türkiye), Seramik Araştırma Merkezi'ne (Eskişehir-Türkiye) teşekkür ederim.

Referanslar

Andrić, L., Acimović-Pavlović, Z., Trumić, M., Prstić, A., & Tanasković, Z. (2012). Specific characteristics of coating glazes based on basalt. *Materials and Design*, 39, 9-13. doi:10.1016/j.matdes.2012.02.022

Aydin, T., & Kara, A. (2014). Effect of spodumene addition on pyroplastic deformation of porcelain stoneware. *Journal of Ceramic Processing Research*, 15(6), 486-491.

Bayer Öztürk, Z., & Eren Gültekin, E. (2014). Avanos yöresine ait killerin duvar karosu sırasında renklendirici olarak kullanılabilirliği. Öger, A. (Editör), T.C. Avanos Kaymakamlığı, Avanos Sempozyum Bildirileri, Grafiker Grafik-Ofset Matbaacılık Reklamcılık Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., Ankara, 907-915.

Cocić, M., Logar, M., Matović, B., & Poharc-Logar, V. (2010). Glass-ceramics obtained by the crystallization of basalt. *Science of Sintering*, 42, 383-388. doi:10.2298/SOS1003383C

Çetin, S., & Kılınç, N. (2004). Tüysüz köyü bazaltının duvar karosu sırlarında kullanım olanakları. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 13 (2), 89-96.

Çetin, S. (2005). Bazalt tüfü kullanılarak yapılan fritlerin endüstriyel ve sanatsal sırlarda kullanımı, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye.

Dvorkin, L. I., & Galushko, I. K. (1969). Glazes based on basalts. *Glass and Ceramics*, 11, 36-38.

Dvorkin, L. I., & Galushko, I. K. (1971). Fritted basalt glazes. *Glass and Ceramics*, 4, 38-41.

Dalakishvili, A. I. (1975). Matte glazes on a basalt base. *Glass and Ceramics*, 5, 36-37.

Eren Gültekin, E. (2018). Transparent glazes with basalt addition. IMMC 2018 (19th International Metallurgy & Materials Congress) Proceedings Book, Istanbul: UCTEA Chamber of Metallurgical and Materials Engineers, 429-432.

Gan, F., Zhao, H., & Xu, Z. (2016). Scientific analysis of natural glasses. Gan, F., Li, Q., & Henderson, J. (Editors), *Recent Advances in the Scientific Research on Ancient Glass and Glaze*, World Century Publishing Corp. and World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.

Gungor, F., Isik, I., Gungor, E., & Eren Gültekin, E. (2019). Usage of ZnO containing wastes in the sanitaryware bodies. *Journal of the Australian Ceramic Society*, <https://doi.org/10.1007/s41779-018-00300-8>.

Matt's Ceramic Action, Basalt as Colorant in Celadon Glazes. <https://mattfiske.wordpress.com/2016/02/28/basalt-as-colorant-in-celadon-glazes/>
(Son erişim tarihi: 11 Mart 2017)

Nevşehir 2012 Yılı İl Çevre Durum Raporu, Nevşehir Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, ÇED, İzin ve Denetimden Sorumlu Şube Müdürlüğü. (2013). 27-41.

Nevşehir 2015 Yılı İl Çevre Durum Raporu, Nevşehir Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, ÇED, İzin ve Denetimden Sorumlu Şube Müdürlüğü. (2016). 38-43.

Prstić, A., Acimović-Pavlović, Z., Pavlović, L., Andrić, L., & Terzić, A. (2007). The application of basalt in the manufacturing of ceramic glazes. *Journal of Mining and Metallurgy*, 43 A, 53-60.

Reben, M., Kosmal, M., Pałczyńska, N., & Pichniarczyk, P. (2016). Waste immobilization and environmental sustainability in glass-ceramics glazes development. *E3S Web of Conferences, SEED*, 10, 1-5. doi:10.1051/2016,101000071

Tunali, A., & Selli, N. T. (2014). Effect of B₂O₃/SiO₂ ratio on transparency of anorthite based glass-ceramic glazes. *Acta Physica Polonica A*, 125(2), 511-512. doi:10.12693/APhysPolA.125.511

Tunali, A., Ozel, E., & Turan, S. (2015). Production and characterisation of granulated frit to achieve anorthite based glass-ceramic glaze. *Journal of the European Ceramic Society*, 35(3), 1089-1095. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2014.09.039

Yalçın Yastı, Ş. (2004). Konya-Çukurçimen ve Doğanhisar çömlekçi kellerinin karakterizasyonu ve renklendirici malzeme olarak değerlendirilmesi, Yüksek Lisans tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.



Hafif Silah Mühimmatları Üretiminde Sertifikasyon Özgünlük ve Tasarım Gereksinimleri ile Kompozit Mühimmatlardaki Gelişmeler

Certification Originality and Design Requirements in Production of Light Weapon Ammunition and Developments in Composite Ammunition

Hande Yavuz

Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06790 Ankara, TÜRKİYE

Başyuru / Received: 21/12/2018

Kabul / Accepted: 26/03/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 04/11/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Dünyanın birçok bölgesinde farklı seviyelerde silahlı çatışmalar devam etmektedir. Bu çatışmaların birçoğu ülkemiz coğrafyasına yakın bölgelerde yer almakta ve Türkiye'nin güvenliğini yakından ilgilendirmektedir. NATO gibi çokuluslu güçler bu çatışmaların önlenmesine yönelik tedbirler almakta ve çoğu zaman askeri kuvvetleri vasıtasıyla bu çatışmalara müdahil olmaktadır. Çatışmalar, doğal olarak ülkelerin savunma güçlerine ihtiyaç duymasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, gün geçtikçe artan ihtiyaçların merkezinde hafif silah ve hafif silah mühimmatı ihtiyacı yer almaktadır. Bu çalışmada, hafif silahlar ve hafif silah mühimmatların üretimine yönelik Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu, NATO Ordu Silahlanma Grubu, ABD Ordusu Araştırma Geliştirme Mühendislik Komutanlığı, ABD Ordusu Silahlanma Araştırma Geliştirme ve Mühendislik Merkezi ve Alliant Techsystems Inc. verisinden faydalanılmak suretiyle hazırlanan değerlendirmelere yer verilmektedir.

Anahtar Kelimeler

“Hafif Silah Mühimmatları, Mühimmat Üretimi, Mühimmat Sertifikasyonu, Mühimmat Tasarımı, Kompozit Mühimmatlar”

Abstract

Various levels of armed conflicts continue in many parts of the world. Many of these conflicts occur in regions close to our geography and are closely related to the security of Turkey. Multinational forces such as NATO are taking measures to prevent these conflicts and are often involved in these conflicts through their military forces. Conflicts naturally force countries to need security measures. Therefore, the need for light weapons and light weapons ammunition is at the center of these increasing needs. In this study, evaluations are driven by using Machine and Chemical Industries Corporation, NATO Army Armaments Group (NAAG), US Army Research Development Engineering Command (RDECOM), US Army Armament Research Development and Engineering Center (ARDEC) and Alliant Techsystems Inc. (ATK) data for the light weapons and the production of light weapon ammunition.

Key Words

“Light Weapon Ammunition, Ammunition Production, Ammunition Certification, Ammunition Design, Composite Ammunition”

1. Giriş

Günümüzde, ileri teknoloji nişan vasıtaları ve diğer ekipmanlarla donanmış, çevresel şartlardan kolayca etkilenmeyen, kullanım kolaylığı sağlayan ve en önemlisi kullanıcı dostu çeşitli hafif silahlar geliştirilmektedir. Hafif silah teknolojisindeki gelişmelerle birlikte etkin, güvenilir, hedef üzerinde istenen etkiyi gösterebilecek ve en önemlisi vuruş hassasiyeti yüksek hafif silah mühimmatlarının geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Silah teknolojisi geliştiren firmaların birçoğunun NATO üyesi ülkelerinin firmaları olması nedeniyle hafif silah teknolojisindeki gelişmeler öncelikle NATO standart çapları olan 9×19 mm, 5.56×45 mm, 7.62×51 mm ve 12.7×99 mm silahlarda yaşanmıştır (DeClerq, 1999). 9×19 mm'deki gelişmeler tabanca teknolojisini, 5.56×45 mm'deki gelişmeler tam otomatik piyade tüfeği teknolojisini, 7.62×51 mm ve 12.7×99 mm'deki gelişmeler ise keskin nişancı silahları teknolojisinde gelişmelere yol açmıştır. Rusya ve eski Doğu Blok ülkeleri ise AK-47, AK-104 ve son olarak AK-12 tipi silah teknolojilerini geliştirmektedirler (Galeotti, 2014; King, 2010). Bununla beraber eski Doğu Blok ülkelerindeki üreticiler teknoloji atılımı yaparak NATO standart çaplarında da silah ve mühimmat üretmektedir (Galeotti, 2014; King, 2010).

Türk Silahlı Kuvvetleri ve Emniyet Genel Müdürlüğünde 5.56×45 mm sınıfında 1990'lı yılların teknolojisini, 7.62×51 mm sınıfında ise daha da eski yılların teknolojisi ve kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayabilen silahlar bulunmaktadır. Bununla beraber son yıllarda yerli üreticiler tarafından yukarıda bahsi geçen çaplara ait hafif silah teknolojisi geliştirmeye yönelik çalışmalar hızlanmıştır. Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu (MKEK) tarafından üretilen 7.62×51 mm MPT-76 ve 5.56×45 mm MPT-55 piyade tüfekleri buna örnek olarak verilebilmektedir (SSB, 2017). Bunun yanında yerli üreticiler tarafından 5.56×45 mm çapında AR-15 platformu esas alınarak üretilmiş hafif silahlar mevcuttur, fakat dış pazarda rekabet gücü sınırlıdır. Ülkemizdeki hafif silah kategorisinde bulunan kısıtlamalar nedeniyle 9×19 mm tabanca ve av tüfekleri dışında kısıtlı miktarda daha büyük çaplarda yivli tüfek bulunması bu çaplara ait hafif silah mühimmatı ihtiyacının alt seviyelerde kalmasına neden olmaktadır. Öte yandan resmi bilgilere göre Türkiye'de 2,3 milyon civarında ruhsatlı yivsiz tüfek ve tabanca (İBBHM, 2018) bulunduğu göz önüne alındığında ve buna karşılık gelen mühimmatın iç pazarda satıldığı düşünüldüğünde sadece bu silah grubunun bile büyük bir iç pazar oluşturduğu değerlendirilmektedir.

2000'li yıllarda 7.62×51 mm, 8.58×70 mm ve 12.7×99 mm keskin nişancı tüfeklerinin envantere sokulmasıyla beraber hem Türk Silahlı Kuvvetleri hem de Emniyet Genel Müdürlüğü için çap çeşitliliği ve ardından bu silahlar için gerekli mühimmat çeşitliliği de artmıştır. Ayrıca, 1990'lı yıllarda envantere giren Rus menşeli silahlar da her iki kurum tarafından kullanılmaya devam etmektedir. Rus menşeli hafif silah grubu içerisinde 7.62×39 mm çapında AK-47 silahı çoğunluğu oluşturmakta olup bunun yanında 7.62×54 mm çapında hafif makineli tüfek ve keskin nişancı silahları yer almaktadır. Bu çalışmada, yukarıda sayılan gelişmeler çerçevesinde hem dünya pazarında hem de iç pazarda kaliteli, etkin, hedefte istenen etkiyi sağlayan ve vuruş hassasiyeti yüksek olan hafif silah mühimmatına talep ve kalite beklentisinin gün geçtikçe arttığı düşünülerek hafif silah mühimmatlarına yönelik sertifikasyon, özgünlük, tasarım hususları ile yeni nesil kompozit mühimmatlara yönelik araştırma sonuçlarına istinaden değerlendirmelerde bulunulmuştur.

2. Gereç ve Yöntemler

Mühimmat üretiminin temelinde çalışılması gereken hususların başında kapsül çakma derinliği, kapsül yuvası, kapsül yuvası deliği, barut miktarı ve çekirdek ağırlığı gelmektedir. Mühimmatın kalitesini belirleyen ve güvenilir olmasını sağlayan tüm bu hususlar elektronik kontrollü denetlenmelidir. Bunun için fişek üretiminde hassas dolum yapan makineler kullanılmalı, üretimi esnasında elektronik algılayıcılarla istenen standart değerinin dışında kalan tüm malzeme elektronik olarak kontrol edilmeli ve gerektiğinde üretim hattının dışına çıkarılmaya olanak verilmelidir. Mühimmat içerisine konan barut önceden iklimlendirmeye tabii tutulmalı ve üretim esnasında da aynı iklimlendirme koşullarında dolum sağlanmalıdır. Bu husus fişek içerisinde yanan barutun daha etkin yanma gerçekleştirmesini ve fişekin çevresel faktörlerden daha az etkilenmesini sağlamaktadır (Carlucci&Jacobson, 2008). Ayrıca üretim esnasında mühimmat üreten makine parkını olumsuz etkileyebilecek elektrik dalgalanmalarına karşı tesis içerisinde yüksek kapasiteli kesintisiz güç kaynağı kurulması gerekmektedir.

Yukarıda bahsedilen ana unsurların haricinde mühimmatın yüksek standartlarda üretilmiş olması ve belli başlı mühimmat testlerini başarıyla geçmiş olması gerekmektedir (EPVAT; SAAMI; CIP). Bahse konu testler mühimmatın kullanımı esnasında; mühimmatın ateş almaması, kovanın dışarıya atılmaması, kovan ağzı basınç değerlerinin aşılması veya istenen basınç değerinin sağlanamaması, barut gazının parçacıklı ve dumanlı olması, namlu ağzı hızının değişkenlik göstermesi, hedefteki dağılımın istenilen ölçüler içerisinde olmaması, mühimmatın çevresel şartlardan kolayca etkilenmesi veya mühimmatın teknik özelliklerinde belirtilenden daha farklı davranması gibi oluşacak risklerin en aza indirgenmesini hedef almaktadır. Dolayısıyla TSEK, ISO 9000 veya AQAP 2120 Kalite Kontrol Belgeleri üretimin kalitesini sertifikaya ettiği göz önünde bulundurulduğunda bu kalite belgelerinin yukarıda sayılan hatalara karşı testlere tabi tutulduğunu göstermediği dikkate alınmalıdır (TSEK; ISO; AQAP).

Mühimmat üretimine yönelik stratejinin belirlenebilmesi için öncelikle ATK'nın (Alliant Techsystems Inc.) Missouri'de bulunan GOCO (Government-owned Contractor-operated) mühimmat fabrikasının çalışma stratejileri araştırılmıştır. Bahse konu fabrikanın denetimi ABD Hükümetinin kontrolünde olup ATK firması üretimden ve fabrikanın verimliliğinden sorumludur (Siekman, Anderson & Boyce, 2010). Bu tip bir ilişki hükümetin işgücü maliyetlerini düşürmekte ve özel sektör girişimcilerinin etkinliklerini ve üretimlerini geliştirmelerine yol açmaktadır. ABD ordusunun hafif silah mühimmatı ihtiyacının (5.56×45 mm, 7.62×51 mm ve 12.7×99 mm) yaklaşık olarak %99'u bu fabrika tarafından karşılanmaktadır (Siekman, Anderson & Boyce, 2010). Toplam ihtiyacın fabrikanın kapasitesini aşması durumunda oluşan açık özel mühimmat üreten firmalarca karşılanmaktadır. Mühimmatı oluşturan unsurların tedariki, her modern üretim stratejisinde olduğu gibi GOCO mühimmat fabrikasının da ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Her bir hafif silah mühimmatı; kovan, çekirdek, barut ve kapsülün doğru şekilde bir araya getirilmesiyle oluşturulmakta

olup fişegin her bir unsuruyrsa değişik malzemeler kullanılarak üretilmektedir. Tablo 1 incelendiğinde, GOCO mühimmat fabrikasının tarafından her bir tip hafif silah mühimmatı üretmek için gerekli unsurlar hem ABD içerisinde hem de ABD dışından temin edildiği anlaşılmaktadır (Siekman, Anderson & Boyce, 2010). Sadece kapsül karışımını oluşturmak için 17 farklı kimyasal bileşen kullanıldığı düşünüldüğünde ABD içinden temin edilemeyen malzemelerin Kanada, Avrupa, Meksika, Hindistan, Brezilya ve Çin'den getirildiği ortaya çıkmaktadır. GOCO dışında diğer ABD'li mühimmat fabrikaları da üretim için ihtiyaç duydukları malzemeleri yurtdışından getirebilmektedirler. Fişek üretimi için gerekli unsurların tedarik edildiği üreticilere bakıldığında; kovan ve pirinç tedarikçilerinden ikinci ikmal kaynağı olan ND PressTec GmbH'in Almanya'da konuşlu olan bir firma olduğu dikkati çekmektedir. İlgili tabloda en dikkat çekici husus ise; fabrikanın tek bir barut sağlayıcısının olmasıdır. ATK firması her bir hafif silah mühimmatında kullanılan barut için sadece St. Powders firmasından tedarik sağlamaktadır. Bunun nedeniyse sadece bahsi geçen firmanın ABD Hükümetinin belirlediği mühimmat üretiminde risk azaltma politikalarına uygun ve üretim kalite standartlarında barut üretebilmesidir.

Tablo 1. GOCO Mühimmat Fabrikasınca fişek üretim unsurlarının tedarik edildiği üreticiler

Unsur / Bileşen	Ana İkmal Kaynağı	İkincil İkmal Kaynağı	Üçüncül İkmal Kaynağı
Kovan (Pirinç)	Olin Brass	ND PressTec GmbH	Luvata Buffalo
Barut	St. Marks Powder	-	-
Çekirdek Nüvesi	Metallico – Granite City	Gopher Resource Corporation	Exide Technologies
Kapsül	Alliant Techsystems	-	-
Kapsül Karışımı	17 farklı kimyasal için farklı tedarikçilerle çalışılmaktadır.		

Dünya üzerinde hafif silah mühimmatı üretimi gerçekleştiren birçok firma için bir tedarik zinciri olması günümüz şartlarında doğal karşılanmaktadır. Mühimmat üreticilerinin hedefi tamamen kendi öz kaynaklarını kullanarak mühimmat üretiminden ziyade, hükümetler, kullanıcılar ve belirli kuruluşlarca tespit edilmiş yüksek kalitede ve standartlarda mühimmat üretimi gerçekleştirmektir. Standart dışı ve/veya belirlenmiş değerleri (kovan ağız basıncı, ilk hız, hassasiyet, dumansız ve temiz barut, çevre şartlarına dayanıklılık) karşılayamayan üreticiler hükümet alımlarının dışında dünya sivil pazarında da yer bulamamaktadırlar. Bugün birçok mühimmat üreticisi bunun farkına varmış ve üretim kalite politikalarını son ürün (final product) üzerine inşa etmişlerdir. Eski Doğu Blok ülkelerinin üreticilerinden Prvi Partizan (Sırbistan) ve Seiller Bellot (Çekya) gibi firmalar üretim kalitelerini yükselterek bugün gerek ABD iç pazarında gerekse dünya pazarında hatırı sayılır yerlere gelmişlerdir (Walker, 2013). Üretim stratejisini yenileyemeyen ve son üründe belli standartları karşılayamayan üreticilerden Sumbro (Makedonya) el değiştirmek zorunda kalmıştır, Belford vd. (2018).

Hafif silah mühimmatları üretimine yönelik yöntemler bütününe ait gereksimler NATO tarafından belirlenmektedir. Bu tip mühimmatlar, NATO tarafından muharebe alanlarında ve barışı koruma operasyonlarında en çok kullanılan ve en önemli unsurlardan birisidir. Bu nedenle NATO tarafından NATO ülkelerince kullanılan ve standart hale getirilmiş mühimmat çaplarına yönelik bir Yeterlilik (Qualification), Üretim (Production) ve Gözetim (Surveillance) sistemi oluşturulmuştur (SMA, 2015; Pellegrino&Kirkman, 2011). Bu sistemin kurulmasındaki temel amaç bir NATO üye ülkesi tarafından üretilen mühimmatın diğer bir ülke tarafından üretilen mühimmat ile emniyetli ve tatmin edici şekilde kullanılabilmesini sağlamaktır. NATO Standartlarında Mühimmat Üretimi için önemli olan unsurlar Standardizasyon Anlaşması, Tespit ve Muayene El Kitapları, NATO Yeterlilik Onayı, NATO Üretim Testi, NATO Gözetim Testi, NATO Bölgesel Test Merkezleri, NATO Milli Test Merkezleri olmak üzere toplam 7 başlık altında irdelenmiştir (SMA, 2015; Pellegrino&Kirkman, 2011; Halpern, 2017; NAAG, 2013).

1. Standardizasyon Anlaşmaları (Standardization Agreements-STANAG): NATO'ya üye ülkelerin tamamı veya bir kısmı tarafından idari, lojistik, operasyon, ikmal maddeleri, mühimmat, donanım ve teçhizata yönelik standartların belirlendiği ve benimsendiği hususların belirtildiği anlaşmalardır. NATO'ya üye ülkelerden oluşturulmuş olan bir Alt Çalışma Grubu (SG-1), NATO'nun mühimmat çaplarına yönelik standartlaştırma ve yeterlilik konularında STANAG'lar hazırlamaktadırlar. NATO tarafından mühimmatlara yönelik oluşturulmuş STANAG'lar; mühimmatların performanslarına yönelik gereklilikleri belirlemekte, numune sayıları veya kabul/ret kriterleri ile ilgili konularda herhangi bir husus belirtilmemektedir. Her bir STANAG içerisinde kovan boyutları ve özellikleri ile mermi çekirdeğine ait çizimler bulunmaktadır. STANAG'lar ülkelerin milli standartlarının yerini alması amacıyla hazırlanmamaktadır.
2. Tespit ve Muayene El Kitapları (Manual of Proof and Inspection Procedures-MOPI): NATO tarafından hafif silah mühimmatlarına yönelik olarak belirlenmiş STANAG'lar ışığında ülkeler tarafından NATO Yeterlilik Onayına sunulan mühimmatların ne şekilde muayene ve test edileceklerini belirleyen talimnamelerdir. MOPI (Manual of Proof and Inspection) olarak anılan bu talimnameler; test yöntemlerini, muayene prosedürlerini ve ilgili testi/muayeneyi yapmak için gerekli ekipmanı tarif etmektedirler. Her bir MOPI, test ve muayeneler için gerekli mühimmat numune sayısını ve kabul/ret kriterlerini içermektedir. NATO MOPI'leri birçok ülke ve üretici tarafından üretim standartları kullanılmakta ve kendi uyguladıkları testler için temel standart doküman olarak kabul edilmektedir. Çok çaplı MOPI (Multi Caliber MOPI) olarak adlandırılan talimname ise; 5.56 mm, 7.62 mm, 9 mm ve 12.7 mm mühimmatlar için ortak testlerin oluşturulması ve böylece ortaya çıkabilecek uyumsuzlukların giderilerek prosedürlerin basitleştirilmesi amacını taşımaktadır.

3. NATO Yeterlilik Onayı (NATO Qualification Approval-NATO QA): NATO Yeterlilik Onayı, NATO üyesi ülkelerin onaylanması amacıyla başvurdukları her bir mühimmat tasarımı için ilgili STANAG ve MOPI'ye uygunluğunu belgelemek için bir defaya mahsus olmak üzere NATO tarafından verilen bir onayıdır. Başvuru yapan NATO ülkesi, tasarımını yapmış olduğu mühimmatın kendi ordusunca kullanımının güvenli ve uygun olduğu ile halihazırda temin edildiğini veya üretimini gerçekleştirdiğini beyan etmek zorundadır. İlgili test ve muayenelerin yapılmasını müteakip başvurusu yapılan mühimmat tasarımına bir "NATO Tasarım Kodu" tahsis edilmekte ve tüm üretilen mühimmatın dış ambalajlarına "NATO Müşterek Kullanım İşaretini" koyması konusunda yetkilendirilmektedir. NATO üyesi olmayan ülkeler ve mühimmat üreticileri, kendi adlarına NATO QA testleri için başvuruda bulunamamaktadırlar. Başvuruların üye ülkelere yapılması gerekmektedir. Tablo 2 incelendiğinde NATO'nun ikinci en büyük kara ordusuna 5.56×45 mm mühimmatı sağlayan Litvanya, Hollanda, Portekiz gibi ülkelerin üreticilerinin istenilen yeterlilikte mühimmat üretebildikleri görülmektedir (NAAG, 2013).

Tablo 2. NATO QA onayı almış 5.56×45 mm mühimmat üreticileri ve sponsor ülkeler

NATO Tasarım Kodu	Sponsor Ülke	Kısaltma Mührü	Basım Tarihi	Üretici
AC/225-111A	ABD	LC WCC TAA	30/06/1987	GOCO, Lake City, ABD Olin Winchester, ABD 205th Arsenal, Tayvan
AC/116-112A	Belçika	FNB	14/11/1989	Fabrique Nationale (FN), Belçika
AC/225-113A	İtalya	SMI	12/04/1990	Europa Metall, İtalya
AC/225-114A	Birleşik Krallık	RG	14/08/1995	Royal Ordnance, Birleşik Krallık
AC/225-116A	Belçika	FNB	16/11/1995	Giat Industrie, France
AC/225-117A	Hollanda	HP	15/05/1996	Hirtenberger, Avusturya
AC/225-118A	Kanada	IVI	17/01/1997	GD-OTS, Kanada
AC/225-120A	Portekiz	FNM	31/08/1998	Indep, Portekiz
AC/225-122A	İtalya	GFL	11/01/1999	Fiocchi, İtalya
AC/225-124A	Birleşik Krallık	RG	24/02/1999	Royal Ordnance, Birleşik Krallık
AC/225-125A	Almanya	DAG MEN	10/03/2000	RUAG, Almanya MEN, Almanya
AC/225-126A	Belçika, Fransa	IMI	10/03/2000	IMI, İsrail
AC/225-128A	Norveç	CG	06/07/2004	NAMMO, İsveç
AC/225-130A	Litvanya	GGG	26/05/2005	GGG, Litvanya
AC/225-132A	Birleşik Krallık	RG	27/01/2006	BAE Systems Radway Green, Birleşik Krallık
AC/225-133A	Birleşik Krallık	RG	30/01/2006	BAE Systems Radway Green, Birleşik Krallık

4. NATO Üretim Testi (NATO Production Test, NATO PT): NATO Yeterlilik Onayı almış üreticilerin kalifiye tasarım mühimmatı ilgili STANAG'da belirtilen standartlarda üretilip üretilmediklerini kontrol etmek amacıyla senelik olarak icra edilen bir testtir. Üretici tarafından test edilmek üzere uygun değerlerde numune sunulamazsa mevcut ve gelecekte üretilen mühimmatlar üzerine NATO Müşterek Kullanım İşareti koymasına izin verilmemektedir. Eğer aynı üye ülkenin sponsor olduğu aynı tasarımda mühimmat üreten birden fazla üretici varsa, üretim testi her bir üreticiden alınacak ayrı numunelerle yapılmaktadır. NATO Alt Çalışma Grubu (SG-1) tarafından yeterlilik göstermiş mühimmat üreticilerinin bir listesi oluşturulmakta ve en son başarılı oldukları üretim testi tarihi bu liste içerisinde belirtilmektedir.
5. NATO Gözetim Testi (NATO Surveillance Test): Üreticilerin, NATO Müşterek Kullanım İşaretini taşıyan mühimmatlarının NATO yeterliliğini karşılayıp karşılamadığını kontrol etmek amacıyla daha önceden belirlenmiş depolama aralıkları (10, 15 ve 20 yıl aralığı) esas alınarak icra edilen bir testtir. Kabul kriterleri yeni üretim mühimmat için (izli mermi randımanı hariç) istenen kriterler ile aynıdır. Mühimmatın NATO yeterliliğini karşılayamaması durumunda ilgili NATO ülkesi, mühimmat ambalajlarının üzerinden NATO Müşterek Kullanım İşaretini kaldırmak ve testi geçemeyen mühimmatın herhangi bir NATO ülkesine gönderilmeyeceğini garanti etmek zorundadır.
6. NATO Bölgesel Test Merkezleri (NATO Regional Test Centers-NATO RTC): NATO Bölgesel Test Merkezleri NATO içerisinde mükemmeliyet merkezleri olarak kabul görmektedirler. RTC'ler sadece İngiltere ve ABD'de bulunmakta ve bu ülkeler tarafından finansal olarak desteklenmektedirler. Test tesislerinin benzeri, ekipman ve eğitimli personel olarak değerlendirildiğinde, dünyanın herhangi bir başka ülkesinde bulunmamaktadır. Buldukları ülkelere bağımsız olarak uluslararası test/değerlendirme merkezi olarak kabul görmektedirler. Ayrıca uluslararası test değerlendirilmelerinde de hakem test merkezi olarak görev yapmaktadırlar. Bahsi geçen test merkezlerinin görevleri; (1) Yeterlilik, üretim ve gözetim testlerinin (Tablo 3) icrası, (2) NATO Milli Test Merkezlerinin sertifikasyonu ve denetlenmesi, (3) Atış alanı standardizasyon testlerinin icrası, (4) Yeni test ekipmanlarının değerlendirilmesi, (5) STANAG ve MOPI geliştirilmesi, (6) Referans mühimmat değerlendirilmesi ve (7) NATO standart silah sistemlerinin değerlendirilmesidir.

Tablo 3. NATO tarafından hafif silah mühimmatlarına uygulanan testler

Yeterlilik testi	Vuruş hassasiyeti, fonksiyon ve emniyet, EPVAT, iz performansı, kovan atma, materyal gerilim, delme kuvveti, sızdırmazlık, paslanmazlık, kapsül hassasiyeti, aşırı hava şartları, barut ve kapsül analizi, duman ve parlama, mermi yolu hassasiyeti, namlu yıpranması, depolama şartları.
Üretim testi	Vuruş hassasiyeti, fonksiyon ve emniyet, EPVAT, iz performansı, kovan atma, materyal gerilim, delme kuvveti, sızdırmazlık, paslanmazlık, kapsül hassasiyeti, aşırı hava şartları, barut ve kapsül analizi, duman ve parlama, mermi yolu hassasiyeti.
Gözetim testi	Vuruş hassasiyeti, fonksiyon ve emniyet, EPVAT, iz performansı, duman ve parlama, mermi yolu hassasiyeti.

7. NATO Milli Test Merkezleri (NATO National Test Center-NATO NTC): NATO Milli Test Merkezleri (NTC) mühimmat çaplarına göre onaylanmaktadır. NTC'ler RTC'ler tarafından periyodik olarak denetlenmekte ve yeterlilikleri test edilmektedir. Milli Test Merkezlerinin yeterlilikleri NATO Alt Çalışma Grubu tarafından onaylanmaktadır. Bahsi geçen test merkezlerinin görevleri; (1) Atış alanı standardizasyon testlerinin icrası, (2) Yeni ekipmanların değerlendirilmesi, (3) STANAG ve MOPI kıstasları ışığında yeni milli tasarım mühimmatların tasarım onaylarının gerçekleştirilmesi, (4) Bölgesel Test Merkezlerinde icra edilen Üretim Testleri öncesinde mühimmatların mevcut tasarım onaylarının yapılması ve (5) NATO Gözetim Testlerinin icra edilmesidir.

3. Bulgular ve Tartışma

Gelişen konjonktür, 12.7×99 mm NATO mühimmatları ve kompozit mühimmatlara yönelik gelişmeler üzerinde etkili olup kullanıcı tanımlı mühimmat ihtiyacını tetiklemiştir. Buna göre, tek yönlü iz bırakan mühimmat, hafifletilmiş mühimmat, mesafesi azaltılmış mühimmat, kendinden güdümlü mühimmat ve kompozit mühimmatlar üzerine sırasıyla değerlendirmelerde bulunulmuştur.

.50 çap Browning Machine Gun (.50 BMG), 12.7×99 mm NATO hafif silah mühimmatı, 1910'lu yılların sonunda Browning marka makineli tüfekler için geliştirilmiş bir mühimmat tipidir. İkinci Dünya Savaşı'nda genel olarak uçaksavar mermisi olarak kullanılmıştır. NATO bu mühimmatı STANAG 4383 ile NATO çapı olarak belirlemiş ve hâlihazırda NATO'nun resmi olarak tespit ettiği 4 standart hafif silah mühimmatı çapından biridir. 12.7×99 mm NATO mühimmatının birçok çeşidi olmakla beraber, genel olarak normal fişek, izli fişek, zırh delici fişek ve yangın çıkarıcı fişek olarak üretilmektedir. 12.7×99 mm NATO mühimmatı uzun süredir keskin nişancı tüfeklerinde kullanılmakta olup daha çok makineli tüfeklerle ve M9 mayonla kullanılmaktadır (Rottman, 2013).

İlerleyen yıllarda 12.7×99 mm NATO mühimmatının kullanım alanının ve sıklığının diğer çaplardaki mühimmatlara kıyasla daha da artacağı ABD ordusu tarafından yapılan bir araştırmayla tespit edilmiştir (Hill, 2014). Tüm mühimmat çaplarının kullanımında, ABD ordusunun çatışma bölgelerinden çekilmesi sebebiyle bir azalma yaşandığı görülmektedir. Bunun yanında 2014 yılında 5.56×45 mm Hafif Piyade Tüfeği mühimmatının kullanımının 2013 yılına göre %32 azaldığı, 7.62×51 mm Hafif Makineli Tüfek mühimmatının kullanımının %23 azaldığı, genellikle ağır makineli tüfek ve keskin nişancı tüfeklerinde kullanılmasına rağmen 12.7×99 mm mühimmatının kullanımının ise sadece %18 azalmıştır.

12.7×99 mm mühimmata artan talep kullanıcı tanımlı (user customized) mühimmat ihtiyacını da beraberinde getirmiştir. Mühimmatın ve özellikle mermi çekirdeğinin boyutları 12.7×99 mm mühimmatı hedef üzerinde kullanıcı tarafından istenen etkiyi gösterebilecek tasarımın uygulanmasına imkan vermektedir. Bu kapsamda örneğin 12.7×99 mm Mühimmat Tasarım Örneklerine tek yönlü iz bırakan mühimmat, hafifletilmiş mühimmat, mesafesi azaltılmış eğitim mühimmatı, kendinden güdümlü mühimmat verilebilmektedir (Hill, 2014).

Tek Yönlü İz Bırakan Mühimmat (One Way Luminescence, OWL) (Wallace, 2018), ABD ordusu tarafından tasarımı yapılan mühimmatın kullanım amacı; piroteknik olmayan kimyasallar kullanarak mevcut izli mühimmatların düşman tarafından atım kaynağının (dost silahın) görülmesi dezavantajını ortadan kaldırarak sadece dost birlikler tarafından takip edilebilmesidir. Tasarlanan mühimmatın bir diğer özelliği ise hem gece şartlarında hem de gündüz şartlarında takibinin yapılabilmesidir.

Hafifletilmiş Mühimmat (Lightweight Small Caliber Ammunition, LSCA) (Wins, 2018), muharebe sahasında ve operasyonlar esnasında hafif piyadenin daha fazla mühimmat veya personel üstü mühimmatın ağırlığı azaltarak aynı sayıdaki mühimmatı daha rahat taşımaması sağlamak amacıyla tasarlanan bir mühimmat tipidir. Yapılan çalışmalar neticesinde mevcut mühimmatların ağırlığı performans kaybı olmadan %10 civarında azaltıldığı kaydedilmiştir. Hedeflenen oran ise %50 dir. Mühimmatın ağırlığını azaltmak amacıyla üzerinde çalışılan ana bileşen mühimmatın kovanıdır. Kovan üretiminde kullanılan klasik pirinç malzeme kullanımı bırakılarak daha sert ama daha ince duvar kalınlığına sahip çelik alaşımı bir malzeme kullanılmıştır.

Mesafesi Azaltılmış Eğitim Mühimmatı (Reduced Range Training Ammunition, RRTA) (Chaplin, 2017), 12.7×99 mm mühimmat ile barış zamanında eğitim yapılmasını en olumsuz yönde etkileyen husus bu mühimmatın azami atış mesafesinin 7000 metre olmasıdır. Mühimmatın çok güçlü olması ve azami mesafesinin uzun olması eğitimi yapacak askerleri oldukça kısıtlı alanlarda eğitim yapmaya zorlamaktadır. Bu nedenle konvansiyonel 12.7×99 mm mühimmatı ile 850 metreye kadar aynı mermi yoluna sahip olan RRTA Mühimmatı geliştirilmiştir. Bu mühimmatı General Dynamics Ordnance firması ile NAMMO firması üretmektedir (Brodin, 2018).

Kendinden Güdümlü 12.7×99 mm Mühimmat (Self Guided Ammunition, SGA) (Dutelle&Becker, 2019), dünya orduları arasında en fazla ilgi çeken 12.7×99 mm mühimmat cinsi Kendinden Güdümlü mühimmat olmuştur. ABD Savunma Projeleri Ajansı ve Lockheed Martin firmasının ortak çalışması sonucunda ortaya çıkan bu mühimmat havada yol alırken hedeften olası kaymaları hesaplayıp gerekli düzeltmeleri vererek hedefe tekrar yönelme özelliğine sahiptir.

Bunların haricinde, ABD ordusu ARDEC’de 5.56 mm, 7.62 mm, 9 mm ve .50 çap mühimmatlar için kurşunsuz mermiler geliştirmeye çalışmaktadır, Lillie vd. (2002). Tungsten düşük toksisiteye sahip olup kurşun gibi kontaminasyon riski oluşturmamakta ve işlevsellik, vuruş hassasiyeti, penetrasyon gibi performans gereksinimleri sebebiyle hafif silah mühimmatlarında kullanılmaktadır. Ayrıca, 5.7 mm P90, FN tarafından 1980’lerin ortalarında P90 makineli tüfekler için geliştirilmiştir (Ness&Williams, 2008). Kullanılan ilk mermi sivri, konik metal bir ceket içinde plastik bir çekirdeğe sahip olan SS90’dır. Ancak, 1990’ların ortalarında NATO, tabancalarda ve makineli tüfeklerde (Submachine Gun, SMG) 9×19 mm’nin yerini alacak yeni bir Kişisel Savunma Silahı (Personal Defense Weapon, PDW) mühimmatı için bir gereksinim oluşturmuştur. İlk olarak, artırılmış personel koruma zırhı penetrasyonu gereksinimi olup merminin 1.6 mm titanyum levha ve 20 kat Kevlar’dan oluşan CRISAT’da (Collaborative Research Into Small Arms Technology) belirtilen hedefte en az 150 m mesafeden penetrasyona sebep olması istenmekte ve hedefte yaralanmaya yol açması gerekmektedir (Ness&Williams, 2008). Bu nedenle FN, SS190 mermisini geliştirmiştir. Bu mermi, ön kısımda sertleştirilmiş çelik arkada alüminyumdan oluşan bir kompozit çekirdekten oluşmaktadır. Sesaltı (Sb193 - beyaz uçlu), izli (L191 - kırmızı uçlu) ve JHP (SS192 - yeşil uçlu) olarak farklı çeşitleri vardır. Rusya, AP (armor piercing, zırh delici) 7N21 ve AP 7N31 ile UTM MMR (Ultimate Training Munitions Man Marker Round) tipi izli kompozit mermiler geliştirmiştir (Ness&Williams, 2008). AP 7N21, AP çelik çekirdeğe sahip olup zırha çarpma anında merminin diğer geri kalan kısmında ayrılmaktadır (5.3 g MV (muzzle velocity, namlu çıkış hızı) 460 m/s). AP 7N31 yine AP çelik çekirdeğe sahip bir mühimmat tipi olup zırha çarpma esnasında diğer geri kalan kısımdan çelik çekirdek kısmı ayrılmaktadır (4.2 g, MV (muzzle velocity, namlu çıkış hızı) 600 m/s). İzli mermi (UTM MMR) ise yine bir kompozit mühimmat tipi olup renklendirilmiş balmumu içeriğine sahiptir. 130 dB(c)’den daha yüksek olup 0.45 g ve MV (muzzle velocity, namlu çıkış hızı) 102 m/s, ME (muzzle energy, namlu çıkış enerjisi) 2.6 J olarak kaydedilmiştir (Ness&Williams, 2008).

4. Sonuç

Günümüz orduları, gelişen konjonktür sebebiyle yakın muharebe ve/veya meskûn mahallerde muharebede kullanabilecekleri etkin, güvenilir, taşıma kolaylığı sağlayan ve çabuk nişan almayı sağlayan hafif silahlara yönelmiştir. Bu ihtiyacı tespit eden hafif silah üreticileri, gerek devlet desteği alarak gerekse kendi öz kaynaklarını kullanarak modern hafif silah üretimine ağırlık vermişlerdir. Dolayısıyla 2000’li yıllarla birlikte dünyadaki gelişmeler neticesinde orduların ve iç güvenliği sağlayan kolluk kuvvetlerinin hafif silah teknolojisi çok hızlı gelişmiştir.

Hafif silah teknolojisindeki bu gelişmeler beraberinde bu silahlarla birlikte kullanılacak mühimmatın da aynı teknolojik seviyede ve son kullanıcının ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde üretilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Soğuk savaş döneminden kalma mühimmat üretme yeteneği yerini doğru ve yüksek kalitede mühimmat üretme yeteneğine bırakmıştır. Bu durumun ortaya çıkmasıyla birlikte doğru ve kaliteli mühimmat üretiminin ancak doğru ve kaliteli fişek bileşenleri ile yapılabileceği anlaşılmış ve mühimmat üreticilerinin tedarik zincirleri küresel bir boyut almıştır. Kendilerini bu teknolojik değişime hazırlayamayan ve gerekli yatırımları yapamayan mühimmat üreticilerinin ise pazar paylarını kaybedeceği ve ürettiklerini satamama gibi bir konuma düşecekleri değerlendirilmektedir.

Hafif silah mühimmatına ilişkin standartlar her geçen gün daha da yükselmekte ve üretici firmalar bu standartları yakalamak adına büyük yatırımlar yapmaktadırlar. Hafif silah mühimmatına olan talebin son 50 yılda her geçen gün daha da arttığı göz önüne alındığında mühimmat üretimi yapmayı planlayan veya halihazırda mühimmat üretimi yapan kuruluşların, üretim kalite ve standartlarını dünyaca kabul görmüş test ve muayene kriterlerini karşılayacak şekilde belirlemeleri, bu kriterlere göre üretim yapmaları ve yakaladıkları standartları devam ettirmeleri gerekmektedir.

Amerikan menşeli silah ve mühimmatların US Department of State, Office of Defense Trade Control’un bir dizi izin ve kontrol süreçlerine tabi olduğu göz önünde bulundurulduğunda, mühimmat ve silah üretimi yapan ve devlet desteği bulunan kuruluşların üretim standartlarını yükseltmesi, özgün tasarımlar geliştirmesi ve kullanıcı tanımlı mühimmat üretimi gerçekleştirilmesinin gerekliliği ve sürdürülebilirliği ortaya çıkmaktadır.

Önümüzdeki yıllarda da hafif silah mühimmatına olan talebin giderek artacağı ve mühimmat üretimine yönelik talep edilen kalite kontrol ile üretim standartlarının da bununla paralel olarak artış göstereceği değerlendirilmektedir. Ayrıca, konvansiyonel mühimmatın üretimine yönelik kalite kontrol ve üretim standartlarının iyileştirilme çalışmaları devam ederken mühimmat tipleri teknolojik gelişmeler doğrultusunda daha hafif ve hassas angaje ihtiyacı karşılayacak şekilde evrilmeye başlamıştır. Bu ihtiyacı

karşılıma yönelik kompozit ve hafif akıllı mühimmat tipleri geliştirilmektedir. Ani müdahale ve iç güvenlik güçlerinin kompozit içerikli hafif akıllı mühimmat kullanan silahlarla donatılabileceği ve etkinliklerinin artırılabilceği değerlendirilmektedir.

Referanslar

- Arvidson, P. (2018). NATO Infantry Weapons Standardization, International Infantry & Joint Services Small Arms Systems Symposium, Exhibition & Firing Demonstration, Dallas, TX, US.
- Allied Quality Assurance Publications (AQAP). (2009). 2120 Üretim için NATO Kalite Güvence Gereklere.
- Belford, A., Cvetkovska, S., Holcova, P., Jovanovska, M., Petrovic, P. & Çela, L. (2018). The Organized Crime and Corruption Reporting Project (OCCRP), Strnad's Balkan Factory Buy-up, Czechoslovak Group.
- Broden, D. (2018). Armament System Forum, Armament System Response to the Evolving Threat Spectrum, The National Defense Industrial Association, Indianapolis, IN, US.
- Carlucci, D. E. & Jacobson, S. S. (2008). Ballistics Theory and Design of Guns and Ammunitions, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA.
- Chaplin, R. (2017). Design and Implementation of Reduced Range Training Ammunition, Armament Systems Forum & Firing Demonstration, Fredericksburg, VA, US.
- Commission Internationale Permanente pour l'épreuve des armes a feu portatives (C.I.P.). (2011). Edition Synthétique des décisions C.I.P en vigueur Bureau Permanent C.I.P, Brussels, Belgium.
- DeClerq, D. (1999). Trends in Small Arms and Light Weapons Development: Non-Proliferation and Arms Control Dimensions, Department of Foreign Affairs and International Trade, Canada.
- Dutelle, A.W. & Becker, R.F. (2019). Criminal Investigation, Fifth Edition, Jones & Bartlett Learning, Burlington, MA, USA.
- EPVAT, NATO Combination Electronic Pressure Velocity and Action Time Test Procedure PFP (NAAG-LG/3-SG/1) D1, Chapter 12, NATO.
- Galeotti, M.. (2014). The rising influence of Russian special forces, Jane's Intelligence Review.
- Halpern, B.H. (2017). NATO Weapons and Sensors Working Group Panel Discussion, Armament Systems Forum.
- Hill, P. (2014). Joint Armaments Forum Exhibition & Technology Demonstration, Phoenix, AZ, US.
- ISO 9000 Kalite Yönetimi ve Kalite Güvencesi Sistem Standartlar Seçim ve Kullanım Kılavuzu.
- İBBHM, T.C. İçişleri Bakanlığı Basın ve Halkla İlişkiler Müşavirliği. (2017). Basın Açıklaması, Ankara.
- King, B.. (2010). Surveying Europe's Production and Procurement of Small Arms and Light Weapons Ammunition, Graduate Institute of International and Development Studies, Geneva, Switzerland.
- Lillie, S., Corbett, M.T. & O'Donnell, R. (2002). How Much Does A Bullet Cost?, Army.
- NATO Army Armaments Group (NAAG). (2013). Multi-Calibre Manual of Proof and Inspection (M-C MOPI) for 5.56 mm, 7.62 mm, 9 mm and 12.7 mm Ammunition.
- Ness, L. & Williams, A.G. (2008). Jane's Ammunition Handbook, 17th Edition, Surrey, UK.
- Pellegrino, D. & Kirkman, C. (2011). NATO Small Arms Ammunition Interchangeability via Direct Evidence Testing, US Army Research Development and Engineering Command.
- Rottman, G. L. (2013). The Big Book of Gun Trivia, Osprey Publishing, Oxford, UK.
- SAAMI Technical Committee SAAMI/ANSI standards. [https:// www.saami.org/](https://www.saami.org/)
- Siekman, M.W., Anderson, D.A. & Boyce, A.S. (2010). Small-Arms Ammunition Production and Acquisition: Too Many Eggs in One Basket, Army Sustainment, 42.
- Small Arms Survey (SMA). (2015). A Project of the Graduate Institute of International and Development Studies, Cambridge University Press.
- SSB, T.C. Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayi Başkanlığı. (2017). Yıllık Faaliyet Raporu, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü Kurumu (TSEK) Türk Standartlarına Uygunluk Belgesi.
- Walker, R.E. (2013). Cartridges and Firearm Identification, CRC Press, Taylor&Francis Group, Boca Raton, FL, USA.

Wallace, J.S. (2018). *Chemical Analysis of Firearms Ammunition and Gunshot Residue*, 2nd Edition, CRC Press, Taylor&Francis Group, Boca Raton, FL, USA.

Wins, C. (2018). US Army Research Development and Engineering Command, US Army Manufacturing Technology.



Production of Boric Acid from Microwave-Dehydrated Ulexite Waste by Oxalic Acid Solution Leaching

Feray Koçan^{1*} , Salih Uğur Bayça² 

¹Celal Bayar University, Science and Arts Faculty, Chemistry Department, 45030 Muradiye, Manisa, TURKEY.

²Kırıkkale University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgy and Materials Engineering, 71450 Yahsihan, Kırıkkale, TURKEY.

Başyuru / Received: 05/04/2019

Kabul / Accepted: 04/09/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 04/11/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Abstract

An investigation was made of the production of boric acid from microwave-dehydrated ulexite waste by leaching with oxalic acid solution. An ulexite waste sample was dehydrated in a domestic microwave oven, and then dissolved in oxalic solution at temperatures of between 25 and 70°C. The experimental data from this dissolution process were analyzed using homogeneous and heterogeneous kinetic models, and the leaching kinetics of the microwave-dehydrated ulexite waste were defined. The activation energy of the oxalic acid solution of the microwave-dehydrated ulexite waste was also calculated.

Key Words

“Boric acid, microwave-dehydrated ulexite waste, dissolution, leaching kinetics, activation energy”

1. Introduction

The commercially produced boron minerals are colemanite, ulexite and tincal. Ulexite is produced in large quantities in Balıkesir, Turkey (Bayca 2009). It is a sodium-calcium borate mineral with a chemical composition of $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, theoretically containing 42.95% B_2O_3 . The water in the structure of ulexite exists as 3 moles of hydroxyl groups and 5 moles of crystal water ($\text{NaCa}[\text{B}_5\text{O}_8(\text{OH})_6]_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Ulexite exists as a white parallel fiber has a triclinic crystal structure and it has relatively low water solubility, % 0.5 at 25°C (Brotherton 1995, Gerhartz 1985).

Crystalline boric acid has a molecular weight of 61.83 g/mol and a boron oxide content of 56.36%, a density of 1.517 g/cm³ with a chemical formula of H_3BO_3 , HBO_3 or $\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ with a melting point of 170.9°C and a crystal structure of the triclinic. It is available in 3 types: orthoboric acid, metaboric acid and tetra boric acid. Boric acid is used as reducing the expansion coefficient of glass to prevent cracking and breaking of glass materials against heat. Boric acid is a glass-forming agent and aids in fiber formation by reducing the viscosity of the melt. Boric acid is used in two opposite locations as micronutrients in low concentrations fertilizers and as plant killers in high concentrations (Roskill, 1999; Smith, 1992).

Studies have been made of the dissolution of ulexite in ammonium nitrate (Demirkiran et al. 2009), phosphoric acid (Dogan and Yartasi, 2009), citric acid (Ekmekyapar et al., 2012), water saturated SO_2 (Alkan and kocakerim, 1987), ammonia solutions saturated with CO_2 (Kunkul et al, 1997), EDTA (Alkan et al, 2000), sulphuric acid (Tunc et al, 1999), thermally dehydrated ulexite in sulphuric acid solution (Kunkul et al., 1997) and acetic acid (Kunkul et al. 1999) were studied.

2. Heating Theory

In conventional heating methods, heat is transmitted from the surface of the material to its center. Compared to these methods, since the heat is produced in the material during microwave heating, the heating speed is high and the processing time is short.

2.1. Conventional heating

In conventional heating, warming starts from the surface of the material and heat advances towards the center of the material. Therefore, at the start of heating, the temperature of the interior of the material is low although the material surface is hot. The material must be heated for a long time to ensure that the temperature of the center of the material and the surface of the material are the same. In the conventional heating process, heat transfer in the material is carried out by conduction and convection. In conventional heating process, it is directly proportional to the heat conduction coefficient of the material. If the heat transfer coefficient of the material is high, the heating time of the material is shortened.

2.2. Microwave heating

Microwaves are non-ionizing electromagnetic waves that cover a certain portion of the electromagnetic spectrum within the wavelength of 1 mm-1 m and the frequency range 300 MHz-300 GHz. The basis of microwave heating is based on the fact that the dielectric material absorbs microwave energy and converts it into heat energy. Microwave heating as dielectric constant and dielectric loss factor are explained by two concepts. The dielectric constant (ϵ') is indicative of the ability of a material showing dielectric properties to absorb microwave energy. The dielectric loss factor (ϵ'') is defined as the ability to convert microwave energy absorbed by a material into heat. The loss factor is the loss of energy that microwave energy passes through a material. The higher the loss factor, the faster the material heats up with microwave energy. Depending on the temperature of the material, chemical composition, physical condition and frequency of electromagnetic waves, the loss factor value may vary. There is also a missing tangent ($\tan \delta$) value. Dipole moment refers to the electrical charge between the poles of molecules with electrical polarity. Dipole moment materials (eg water molecule) produce heat when exposed to microwave. The dipole-moment molecules exposed to the electric field of the microwave are aligned with the applied field as a result of the rotational movement. As a result of the frictional force caused by this rotational movement, the molecules gain energy and warm up. Domestic microwave ovens operate at a frequency of 2.45 GHz because they absorb water molecules very well. Molecules of a substance absorbed in a microwave oven at this frequency vibrate 2.5-3 billion times per second to gain kinetic energy, so that the material heats up (Banik et al., 2003; George et al., 1991; Siguemoto et al., 2016; Guo et al., 2011).

The duration of the microwave heating process depends on the water content, density, mass, dielectric constant and ion charge of the material to be heated. In addition to these factors, microwave heating also affects other parameters such as operating frequency, power, thermal conductivity properties and specific temperature of the microwave. As a microwave-heated material is hotter than the inside, it creates cracks in the water depending on the strength of the material as it evaporates. Thanks to this effect, microwave energy is also used in mining to increase the degradability of ores by forming cracks in the material before grinding and increasing existing cracks (Gungoren et al., 2016; Demir et al., 2017; Vorster, 2001; Al-Harshsheh ve Kingman, 2004).

In this study, it was aimed to investigate the production of boric acid from microwave-dehydrated ulexite waste by leaching with oxalic acid solution. Furthermore, dissolution kinetics of ulexite waste dehydrated by microwave heating in oxalic acid solutions was studied. Homogeneous and heterogeneous models were examined to detect kinetics of the solubility of microwave-dehydrated ulexite waste in oxalic acid solutions. The activation energy of the leaching of the microwave-dehydrated ulexite in the oxalic acid solutions waste was calculated.

3. Materials and method

Ulexite waste material was provided by Etimine Bigadic Boron Works in Turkey. It was dried at room temperature, and the sample was ground in a mortar and sieved through a 500 μ m sieve. Grinding continued until the oversize was 1%.

3 g of weighed under-sieve ulexite waste sample was placed on porcelain crucible. Crucible was heated in a household microwave oven at 700 W for 20 minutes. The temperature of the ulexite waste heated in the microwave was measured using an infrared thermometer.

The methyl red, D-mannitol, sodium hydroxide, oxalic acid, and phenolphthalein reagents were provided from Merck. The B₂O₃ content of the liquid phase was examined by the Koklu et al. (2003) titration procedure.

In a typical experiment, a three-necked flask connected to a spiral condenser on a neck was placed in a solution of sulfuric acid and heated in a water bath at a specified temperature. When this solution temperature reached the desired temperature, weighed calcined ulexite waste was added to this solution. This solution was stirred at 500 rpm stirring speed for 30 minutes. At the end of this time, this solution was filtered on filter paper. The filtration filtrate was heated to 35°C to obtain boric acid crystals.

4. Results

In the chemical analysis of the ulexite waste, it was determined that it contained high amounts of boron oxide, with 27.87% CaO, 21.83% B₂O₃, and 10.7% SiO₂. Table 1 shows the chemical analysis of the ulexite waste.

Table 1. Chemical analysis of ulexite waste

Compounds	CaO	B ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	SrO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	KK
Percent	27.87	21.83	10.74	3.72	3.01	2.11	0.33	0.18	30.21

In the XRD analysis of ulexite waste, major minerals were found to contain ulexite, colemanite, dolomite, calcite, quartz, minerals. Ulexite waste contains two boron minerals as major. These are 27.87% ulexite and 19.65% colemanite.

4.1. Microwave-dehydration

500 μ m of undersize ulexite waste was heated in the microwave domestic oven for 20 minutes. The temperature of the ulexite waste reached to 295°C by microwave heating at 700 W power. Eymir et al. (2005) reported that calcination of ulexite by microwave heating has reached a power of 600 W and a temperature of 295°C.

The following reaction can occur as a result of heating the ulexite mineral in the ulexite waste sample by microwave (Eq 1).



As a result of heating by microwave, the ulexite mineral becomes dehydrated and loses some of its crystal water.

The following reaction can occur as a result of heating the colemanite mineral in the ulexite waste sample by microwave (Eq 2).



As a result of microwave heating, the colemanite mineral dehydrates and loses some of the crystal water.

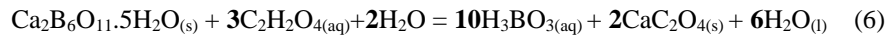
The original ulexite waste was 21.83% B₂O₃, while the microwave-dehydrated sample contained 29.04% B₂O₃. A 33.03% increase in B₂O₃ content was observed when the ulexite waste was dehydrated in the microwave oven. This increase can be attributed to a portion of the crystal water of the ulexite, which is dehydrated in the microwave oven.

4.2. Dissolution reactions

The dissolution reaction of the microwave-dehydrated ulexite waste in oxalic acid solutions is given below. The following reactions can occur as a result of the leaching of the ulexite mineral present in the microwave dehydrated ulexite waste sample in the oxalic acid solution (Eq 5).



The following reactions can occur as a result of the leaching of the ulexite mineral present in the microwave-dehydrated colemanite waste sample in the oxalic acid solution (Eq 6).



The leaching of microwave-dehydrated ulexite waste in oxalic acid solution concluded in boric acid, calcium sodium and oxalate microwave-dehydrated ulexite waste leached in a hot oxalic acid solution and a leach solution was obtained. Liquid and solid phases were separated by filtering the leach solution. The white boric acid crystals precipitated when the liquid phase was cooled.

4.3. Influence of temperature on leaching efficiency

In order to define the influence of temperature on the acid leaching process of the microwave-dehydrated ulexite waste, the process was examined at temperatures of 25, 40, 50, 60 and 70°C.

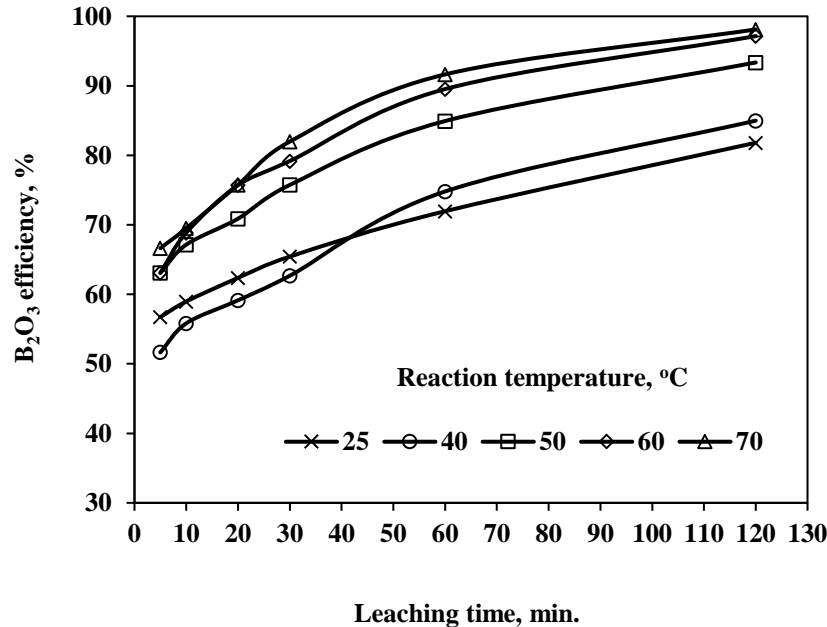


Figure 1. Influence of temperature on leaching of microwave-hydrated ulexite waste

The constant parameters of the leaching experiments were a stirring speed of 200 rpm, a solid-liquid ratio of 1% and an acid concentration of 4%. The findings are seen in Figure 1.

At a constant temperature of 25°C, the leaching efficiency increased from 56.73% to 81.80% B_2O_3 as the leaching time increased from 10 to 120 minutes. As an increment in the leaching time between 10 and 120 minutes was observed at a constant temperature of 70°C, the leaching efficiency started at 66.63% and reached 98.11% B_2O_3 . When the reaction temperature was increased from 25°C to 70°C, the leaching efficiency of B_2O_3 increased from 56.73% to 98.11% B_2O_3 .

4.4. Kinetic analysis

Reaction rates are explained as heterogeneous or homogeneous reaction in a liquid-solid reaction system. In homogeneous reactions, all reacting materials are present in a single phase.

The kinetics of a first order homogenous reaction control model is shown by the following equation.

$$k t = -\ln(1 - X) \quad (3)$$

The kinetics of a second order homogenous reaction control model is shown by the following equation.

$$k t = [X(1 - X)^{-1}] \quad (4)$$

where k is the reaction rate constant (min^{-1}), t is the time (min), and X is the fraction reacted (Levenspiel, 1999).

The dissolution kinetics of the microwave-dehydrated ulexite waste in the oxalic acid solutions were analyzed by homogeneous and heterogeneous kinetic models. Heterogeneous kinetic models did not conform to the dissolution reaction in the oxalic acid solutions of the microwave-dehydrated ulexite waste. According to these results, it was determined that the kinetics of dissolution in the oxalic acid solutions of microwave-dehydrated ulexite waste matched the first degree homogeneous kinetic model. The graph of dissolution of the microwave-dehydrated ulexite waste in the oxalic acid solution is given in Figure 2.

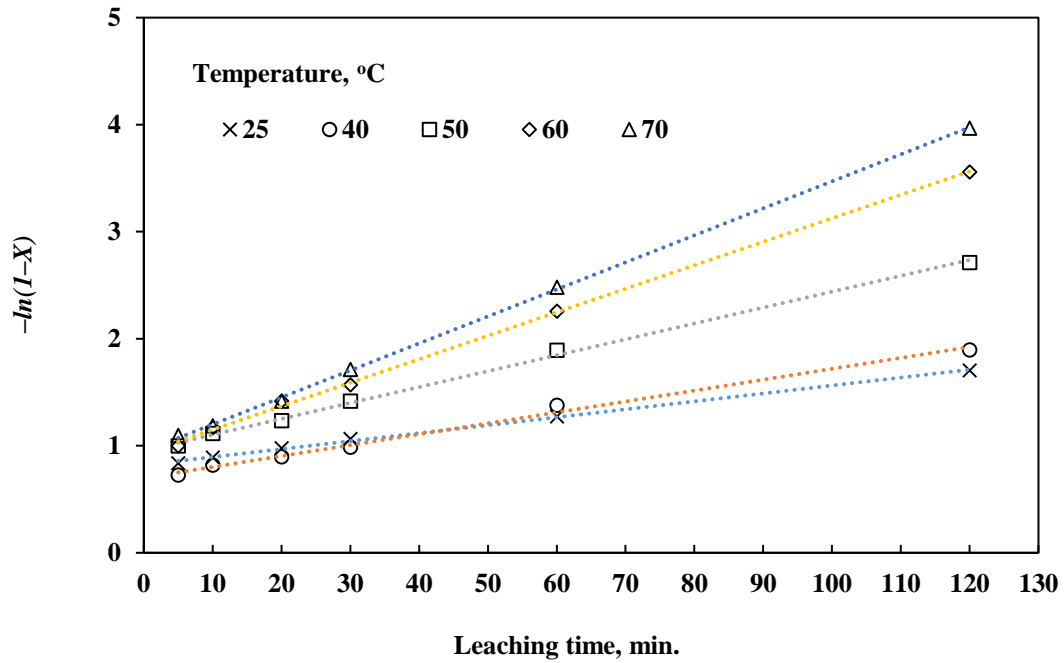


Figure 2. Variation of $-\ln(1-X)$ versus time.

To calculate the activation energy of the leaching reaction, the Arrhenius graph was plotted using the data in Figure 2. Using the results shown in Figure 2, a graph was plotted $\ln k$ against $1/T$ and Figure 3 was obtained. The energy of microwave-dehydrated ulexite waste in oxalic acid solutions was calculated from the inclination of the Arrhenius graph by 25.04 kJ/mol. The k value increased as a result of increasing temperature. In other words, the reaction rate increased with increasing temperature.

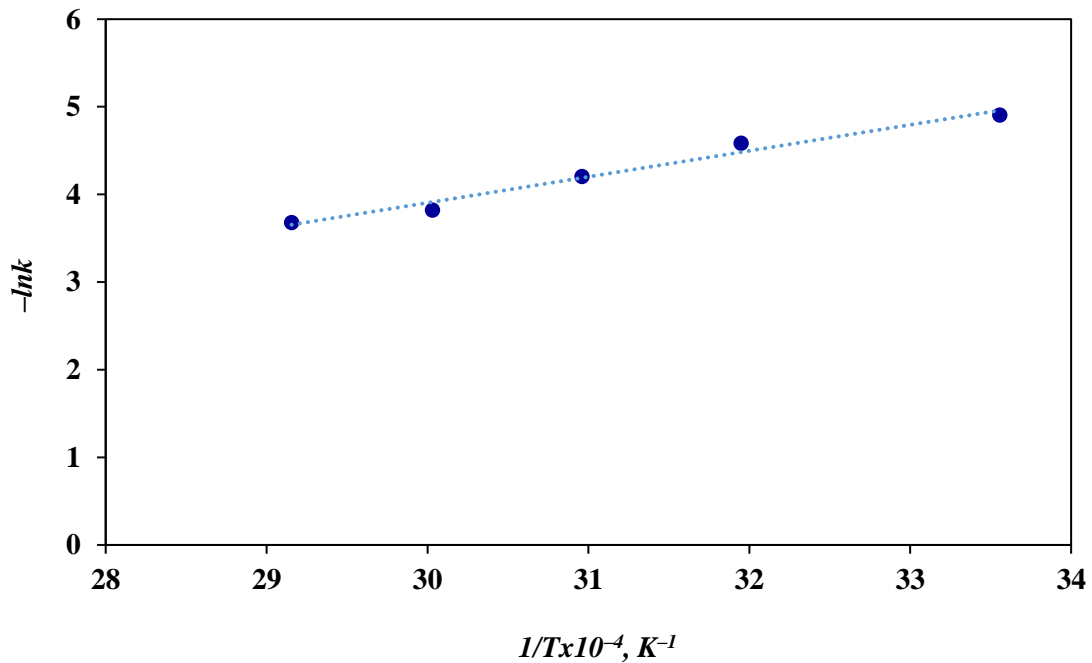


Figure 3. Arrhenius graph of dissolution of microwave-hydrated ulexite waste in oxalic acid solutions

5. Discussions

Bayca et al (2014) studied the dissolution of ulexite in oxalic acid solutions. The dissolution rate of ulexite waste increased with increasing temperature and stirring rate. Stirring rate had very little effect on dissolution rate in a dissolution time of 120 minutes. As a result of the dissolution of ulexite in oxalic acid solution, boric acid and sodium oxalate were formed in the liquid phase, while calcium oxalate, magnesium oxalate and quartz were formed in the solid phase. Pure boric acid crystals with cooled liquid phase were obtained. The kinetic model of the dissolution process was determined to be a first-order reaction control model. The activation energy was found to be 41.09 kJ/mol.

In this study, the production of boric acid from microwave dehydrated ulexite waste by leaching oxalic acid solution was investigated. Ulexite waste was heated in a 700 W domestic microwave oven for 20 minutes. The temperature of the ulexite waste increased to 295°C after this time. Ulexite mineral contains sodium calcium borate and 8 moles of crystal water. As a result of microwave calcination, most of the crystal water in the ulexite has evaporated. While the grade of ulexite waste was 21.83% B₂O₃, the result of microwave heating increased to 29.04% B₂O₃. This microwave calcination resulted in a 33.03% increase in the boron oxide content of the ulexite waste. The activation energy required for dissolution of ulexite waste in oxalic acid solution is 41 kJ/mol, while the activation energy required for dissolution of microwave dehydrated ulexite waste in oxalic acid solutions is 25.04 kJ/mol. Microcracks and porosities formed by calcination of ulexite increase the contact of leaching reagent (oxalic acid solution) with the particles. Increased contact of the leaching reagent with the ulexite particle may increase the rate of dissolution of the ulexite. These results are consistent with the literature. Ulexite exfoliates as a result of gradual water vapour removal, and the structure becomes amorphous with numerous microcracks and interstices (Sener et al., 2000).

As a result of this study, the filtrate of the leach solution was crystallized. These crystal particles were found to be boric acid crystals containing 56.2% B₂O₃.

6. Conclusions

In XRD analysis, ulexite wastes were found to contain the major minerals ulexite, colemanite, dolomite, calcite and quartz. Chemical analysis showed that ulexite wastes contained 21.8% B₂O₃ boron oxide. The solubility of microwave-dehydrated ulexite waste in oxalic acid solutions increased with increasing temperature. The leaching efficiency of microwave-dehydrated ulexite waste in oxalic acid solutions was 98.11%. It was determined that the leaching kinetics of the oxalic acid solutions of the microwave-hydrated ulexite waste matched the first order homogeneous kinetic model. The activation energy of the leaching of the microwave-dehydrated ulexite waste in oxalic acid solutions was figured out to be 25.04 kJ/mol. Optimum conditions for boric acid production were a stirring speed of 200 rpm, a solid-liquid ratio of 1%, an acid concentration of 4% and a reaction temperature of 70°C.

References

- Al-Harashsheh, M., Kingman, S.W. (2004). Microwaveassisted leaching-a review. *Hydrometallurgy*, 73 (3-4), 189-203.
- Alkan, M., Cifci, C., Ayaz, F. Dogan, M. (2000). Dissolution kinetics of ulexite in aqueous EDTA solutions. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 39, 433-440.
- Alkan, M., Kocakerim, M.M. (1987). Dissolution Kinetics of Ulexite in Water Saturated by Sulphurdioxide. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 40, 215-222,
- Banik, S., Bandyopadhyay, S. and Ganguly, S. (2003). Bioeffects of microwave-a brief review. *Bioresource Technol*, 87, 155-159.
- Bayca, S.U. (2009). Effects of the addition of ulexite to the sintering behavior of a ceramic body. *Journal of Ceramic Processing Research*, 10, 162-166.
- Bayca, S.U., Kocan, F. Abali, Y. (2014). Investigation of Leaching Kinetics of Ulexite Waste in Oxalic Acid Solutions. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 28 (3) 273-280.
- Brotherton, R.J. (1995). *Encyclopedia of Inorganic Chemistry*, Wiley, New York, USA, 363-367.
- Demir, I., Güngören, C., Özkan, Ş.G. (2017). Mikrodalga enerjisinin kolemanit cevherinin ufulanmasına ve flotasyonuna etkisi, *Boron*, 2, 75 – 81.
- Demirkiran, N. (2009). Dissolution kinetics of ulexite in ammonium nitrate solutions. *Hydrometallurgy*, 95, 198-202.
- Dogan T., Yartasi, A. (2009). Kinetic investigation of reaction between ulexite ore and phosphoric acid. *Hydrometallurgy*, 96, 294-299.
- Ekmekyapar, A., Kunkul, A., Demirkiran N. (2012). Kinetic Investigation of Reaction Between Mineral Ulexite and Citric Acid. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 31, 250 – 255.
- Eymir, C., Okur, H. (2005). Dehydration of Ulexite By Microwave Heating, *Thermochimica Acta*, 428, 125-129.
- Gerhartz, W. (1985). *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley, Germany, A4, p. 263, 272, 274, 275.
- George, R.M. and Burnett, S.A. (1991). General guidelines for microwaveable products. *Food Control*, 2 (1), 35-44.

- Gungoren, C., S.G., Ozkan, Hacifazlioglu, H. (2016). Mikrodalga kurutmanın linyit kömürünün öğütülebilirliğine etkisi, Bilimsel madencilik dergisi, 55, 15 – 22.
- Guo, W., Liu, Y., Zhu, X. and Wang, S. (2011). Temperature-dependet dielectric properties of honey associated with dielectric heating. Journal of Food Engineering, 102, 209-216.
- Koklu, M., Ozyetis, O., Maraslioglu, D., Yavuklu E., Celen, B., Tufan T., Gunduz, M. (2003). Developments in analyzes of calcium borate. (in Turkish), 18 International Mining Congress and Exhibition of Turkey, 10 – 13 June, Antalya, pp. 141 – 146.
- Kunkul, A., Yapici, S., Kocakerim, M.M., Copur, M. (1997). The dissolution kinetics of ulexite in ammonia solutions saturated with CO₂. Hydrometallurgy, 44, 135–145.
- Kunkul, A., Tunc, M., Yapici, S., Ersahan, H., Kocakerim, M.M. (1997). Dissolution of thermally dehydrated ulexite in sulphuric acid solution. Industrial & Engineering Chemistry Research, 36, 4847–4851.
- Levenspiel O. (1999). Chemical Reaction Engineering, New York, John Wiley and Sons.
- Roskill, 1999, The Economics of Boron, roskill Information Services Ltd, london England.
- Sener, S. Ozbayoglu, G. Demirci, S. (2000). Changes in the structure of ulexite on heating, Thermochem. Acta 362, 107–112.
- Siguemoto, E.S. and Gut, J.A.W. (2016). Dielectric properties of cloudy apple juices relevant to microwave pasteurization. Food Bioprocess Technology, 9, 1345 – 1357.
- Smith, R.A., McBroom, R.B. (1992). Boron Compouns, Kirk othmer Encyclopedia of Chemical Technology vol 4, New York, John Wiley and Sons.
- Tunc, M., Kocakerim, M.M., Yapici, S., Bayrakceken, S. (1999). Dissolution mechanism of ulexite in H₂SO₄ solution. Hydrometallurgy, 51, 359–370.
- Vorster, W. (2001). The effect of microwave radiation on mineral processing. The University of Birmingham, Birmingham, p. 256.



Sodyum Silikoflorürün Mikroyapı ve Isıl Davranışlarının İncelenmesi

Microstructural Study and Thermal Behavior of Sodium Silicofluoride

Ashlı Çakır Arianpour¹ , Farzin Arianpour² , Behnam Aali³ 

¹ Department of Ceramic, Faculty of Fine Arts and Design, Kastamonu University, Kastamonu, TURKEY

² Research and Application Center, Kastamonu University, Kastamonu, TURKEY.

³ Research & Development Center, Arya Tabalvor Arvand Co, Abadan, IRAN.

Başyuru / Received: 31/05/2019

Kabul / Accepted: 09/08/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 04/11/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Sodyum silikoflorür, Na₂SiF₆'nın kimyasal formülü ile son zamanlarda seramik, metalurji ve kimya mühendisliği gibi çeşitli endüstrilerde birçok uygulama alanı bulan inorganik sentetik bir malzemedir. Bu tozun en önemli kullanımlarından bazıları opal cam-seramik, sırlar ve fritlerdir. Uygulama alanlarının gün geçtikçe artmasına karşı, literatürde sodyum silikoflorür (SSF) ile ilgili sınırlı sayıda kaynak mevcuttur. Bu araştırmada, ticari bir sodyum silikoflorür tozunun ısıl davranış ve mikroyapı açısından karakterize edilmiştir. Termal analiz, hava atmosferinde 900 °C'de diferansiyel termal ve termo gravimetri eğrilerine göre araştırılmıştır. Mikroyapısal analizler, taneciklerin tane büyüklüğü ve morfolojisini incelemek için taramalı ve geçirimli elektron mikroskopları kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar, ticari sodyum silikoflorür malzemesinin, eşlik eden bir endotermik reaksiyonla havada 430-600 °C sıcaklık aralığında çözüldüğünü göstermiştir. Mikroyapısal karakterizasyonlarla, incelenen SSF tozunun granüler morfolojisi, altıgen şekilli prizmaların ve ilgili gözeneklerin varlığına da açıklık getirmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Sodyum silicoflorür, Karakterizasyon, Termal analiz, Elektron mikroskobu.”

Abstract

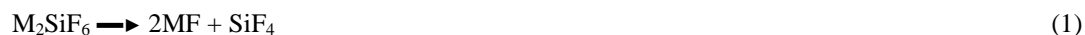
Sodium silicofluoride, with the chemical formula of Na₂SiF₆, is an inorganic synthetic material which recently found lots of applications in various industries such as ceramic, metallurgy and chemical engineering. One of the main important usages of this powder is in the production of opal glass-ceramics, glazes and frits. Despite the expansion of its applications, the properties of this material were not investigated deeply elsewhere. In this research, a commercial sodium silicofluoride powder was studied and characterized in terms of thermal behavior and microstructure. The thermal analysis was investigated according to the differential thermal and thermo gravimetry curves by heating the material up to 900 °C in air. The microstructural analyses were also performed using scanning and transmission electron microscopies to study the grain size and morphology of the particles. The results showed that this commercial sodium silicofluoride material is decomposed in the temperature range of 430-600 °C in air by an accompanied endothermic reaction. The microstructural characterizations were also clarified the granular morphology of the studied SSF powder, existence of the hexagonal shaped prisms and associated pores.

Key Words

“Sodium silicofluoride, Characterization, Thermal analysis, Electron microscopy.”

1. Introduction

Fluorosilicate materials are the group of chemical compounds that are termed as complex fluorides. The typical chemical formula is as M_2SiF_6 and $NSiF_6$ where M and N could be any of the alkali or alkaline earth ions, respectively (Coyle et al., 1981). Sodium fluorosilicate (SSF) is also known as sodium hexa fluorosilicate, sodium fluosilicate and sodium hexa fluosilicate, is an inorganic synthetic mineral (Kumar et al., 2010). The crystal structure of sodium silico-fluoride consists of two octahedral $[SiF_6]^{2-}$ accompanied by two independent sodium cations (Zhang et al., 2017). It is a colorless, odorless and tasteless powder having hexagonal crystal structure. It is soluble in ether and insoluble or weak soluble in most of the alcohols such as ethanol and isopropanol. The solubility of this matter is greater in acid rather than in water. Precipitation process is a general route for the production of sodium fluosilicate fine crystals, using sodium chloride or sulphate solutions and fluosilicic acid as raw materials. Crystallization of sodium fluosilicate happens immediately when starting chemicals are mixed (Toure et al., 2012). It decomposes in alkaline solution and produces sodium fluoride (NaF) and silicon dioxide (SiO_2) (Ciavatta et al., 1988). All the alkali, alkaline earth type silicofluoride chemicals would lose SiF_4 during thermal decomposition according to the following reactions:



Generally, the decomposition temperatures of these types of compounds range from 300 and 700 °C which may depend to the atmosphere. SSF is also decomposed to sodium fluoride and silicon tetrafluoride (SiF_4) by heating at 300 °C. It is generally noxious and its dust may cause irritation of eyes, skin, and mucous membranes (Smith, 1985). Nowadays, SSF has found lots of applications in various products and industries. It is used in the production of the opal glasses and vitreous enamels as opacifier, aluminum casting as foundry additives, welding electrodes and powders as cover flux and wood preservation as coagulator (Khan et al., 2015).

It has also wide applications in the insecticides and pesticide industry, fluoridation of potable water, fluorinating agent in pharmaceutical industry such as toothpaste, coagulant agent for latex, hygroscopic agent of acid resistant concrete, acidifying agent in textile finishing and leather industry for pre-treatment of hides before tanning (Hattab, 1987; Smith, 1985). Recently it was reported the usage of SSF powder in some advanced applications such as cryolite production, coated papers, foam production, filler for bonded abrasives, rubber tires and acid clay manufacturing. As an important fluorosilicate chemical, sodium fluorosilicate has also received considerable attention high-tech products and synthesis over the past decades (Yeo et al., 2016). It was widely used as a versatile template to synthesize $NbSi_2$ films, Si_3N_4 fibers, Si nanowires, red phosphors and Pt nanotubes (Arai et al., 2011; Jeong et al., 2010). Table 1 lists some of the general specifications of the sodium silicofluoride material. Figure 1 also shows the schematic hexagonal structure of this inorganic compound.

Table 1. Specifications of sodium silicofluoride.

Chemistry	Na_2SiF_6
Molar mass	188.05 g/mol.
Crystallography	Hexagonal
Density	2.7 g/cm ³

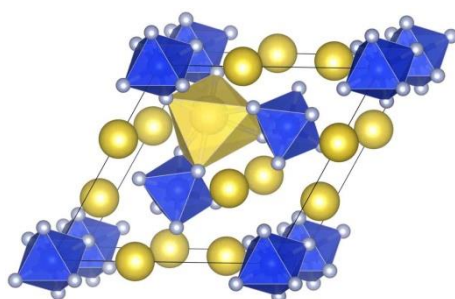


Figure 1. Crystal structure of sodium silicofluoride.

Although SSF material has found recently many industrial applications, but its properties were not investigated deeply in literature. On the other hand the application of this material is gradually increasing in ceramic industry such as the production of opal glasses, enamels, frits and other advanced ceramic materials such as nitrides (Andreeva et al., 1986). In this regard, the understanding of thermal behavior and microstructural properties of this material would be a key-point for ceramic scientist to develop the new technological performance and application for this material. There are some reports in literature on thermal characterization of SSF powder (Vanka et al., 1980). However, according to the knowledge of authors, there are rare studies on the characterization of commercial products. In this research, a commercial sodium silicofluoride powder was supplied and investigated in terms of thermal analysis (DTA/TGA/DTG) in air do reveal the decomposition behavior by heating. Also the

morphology and grain size of the product were investigated using scanning and transmission electron microscopy (SEM/TEM) techniques.

2. Experimental Procedure

Sodium silicofluoride (SSF) sample was delivered from Arya Tabalvor Arvand Co. (Abadan, Iran) as a granular white powder. The technical properties of the sample are summarized in Table 2 according to the data sheet. The as-received powder was used in the characterization tests without further purification or chemical processing. The powder was previously dried in an electric oven at 105 °C for 12 h, milled and passed through a 200 µm sieve to obtain a homogeneous sample.

Table 2. Characteristics of the studied sodium silicofluoride sample.

Purity (wt. %)	> 99.2
Density (g/cm ³)	2.679
Fe (wt. %)	0.01
Pb (ppm)	10
Loss/105 °C (wt. %)	0.30
< 40 mesh (wt. %)	99
> 325 mesh (wt. %)	5

Thermal decomposition was studied via differential thermal analysis (DTA), thermo-gravimetry (TG) and differential thermo-gravimetry (DTG) on a TA 7000 thermal analyzer (Hitachi, Japan). Around 35 mg of powder was poured in a platinum cell and heated with the rate of 5 °C min⁻¹ up to 900 °C in air. Microstructure and morphology of the sample was investigated using a FEG 250 field emission scanning electron microscope (FE-SEM, QUANTA, Czech). For sample preparation, a small amount of powder was dispersed into distilled water, spread on a carbon bond and then coated with a thin layer of gold-platinum using a sputtering coater. A JEM 2100 transmission electron microscope (TEM, JEOL, Japan) working at 200 kV equipped with an energy dispersive spectroscope (EDAX, Oxford, UK) was employed for accurate microstructural analysis. TEM sample was prepared by ultrasound dispersion of SSF powder into isopropanol alcohol, putting a small drop onto a 200 mesh copper grid and covering it by an amorphous carbon film. The micrographs have been taken in the bright field (BF) mode.

3. Results and Discussion

Figure 2 shows the thermal behavior of sodium silicofluoride sample which was heated up to 900 °C in air. The differential thermal analysis (DTA), thermo-gravimetry and differential thermo-gravimetry curves are shown in this picture. Table 3 lists the summary of the thermal analysis data according to the DTA, TG and DTG curves. As it is clearly seen in the thermal analysis curves of Figure 2, there is an important phenomenon in the temperature range of 500-600 °C. DTA curve shows an endothermic peak at 563 °C, while the maximum temperature was detected equal to 577 °C from DTG. According to the TG curve, the thermal decomposition of studied sodium silicofluoride material started at 432 °C and after 55.46 wt.% weight loss, completed at 596 °C. The thermal decomposition of fluosilicates of alkaline and earth alkaline metals happen in the range of 300-700 °C. It was mentioned before that 1 mole of sodium fluosilicate (Na₂SiF₆) would be decomposed to 2 moles of sodium fluoride and 1 mole of silicon tetrafluoride as decomposition products by heating (Yeo et al., 2016). Sodium fluoride (NaF) is a stable salt which remains after reaction as a solid product. However, silicon tetra fluoride (SiF₄) is a gas product and would evaporate after decomposition. Theoretically, the accompanied weight loss of the reaction should be around 55.32 wt.% which is closed to the obtained value from TG. The decomposition temperature of sodium silicofluoride could have important effects on the desired applications and properties of the produced products. This temperature, as it is clear in the obtained thermal analysis results, could vary in different ranges of heat (300-650 °C) (Vanka et al., 1980).

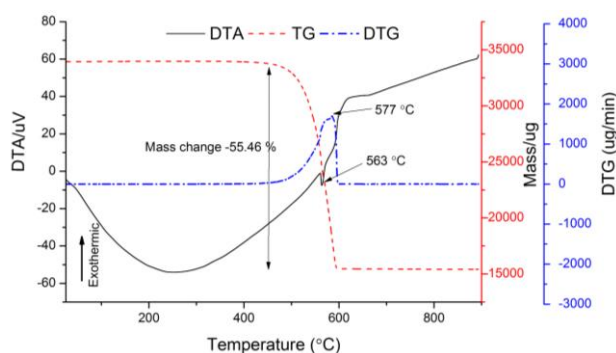


Figure 2. Thermal analysis curves of sodium silicofluoride after heating in air up to 900 °C.

The thermal analysis results show that the decomposition phenomena of SSF could not happen in a sharp temperature which is attributed to the impurity presence in the commercial product and also kinetically criteria of the reaction. Generally the

decomposition reaction could start from the surface of SSF grain and push forward from surface to the core of the particles. The formation of NaF layer (solid product of the decomposition reaction) on the surface of the sodium silicofluoride particles could decrease the diffusion rate and act as a barrier for SiF₄ gas to remove out. This phenomenon could control the speed of composition and lasting the needed time of the reaction to be completed. On the other hand, it could be said that the complement of the reaction and transformation of all sodium silicofluoride material could be postponed to the higher temperatures (500-650 °C) rather than the thermodynamical expectations. The temperature range of thermal decomposition of sodium silicofluoride could be a kind of an important issue in the thermal regime designing and production of some kinds of ceramics such as opal glasses and glass-ceramics using SSF as raw materials.

Table 3. Thermal analysis data.

Average reaction temperature, DTA	563 °C
Reaction temperature range, TG	432-596 °C
Average reaction temperature, DTG	577 °C
Weight loss, TG	55.46 wt. %

Figure 3 shows the scanning electron microscopy micrographs and morphology of the studied sodium silicofluoride powder at different magnifications. Figure 3 (a) shows the morphology and size of the SSF particles at lower magnification. As it is visible in this figure, this commercial SSF powder was produced in the granular form which shows a wide distribution of particle sizes in the range of 10-50 µm. The size of the granules is strongly depended on the production process of the powder, thermal regime of the calcination and drying process of the commercial SSF products. Figure 3 (b) also shows the morphology of a granule under higher resolution. As it is clear, the granule consisted of the grown hexagonal prisms with some visible pores on the section profiles of the rods. Figure 4 (a) shows the high-resolution transmission electron images of the studied commercial sodium silicofluoride powder. The hexagonal shapes of prism are also clear in this image. Figure 4 (b) demonstrates the line scan chemical analysis of the grain from center toward out of the particle. According to the theoretical chemical formula, the main constitutional elements of the silicofluoride of the sodium are sodium (Na), silicon (Si) and fluorine (F) with the weight percentage of 24.47, 14.89 and 60.64 (Arai et al., 2011). The major elements were also detected as Na, Si, and F. Oxygen and calcium elements were also characterized and detected in the EDAX chemical analysis of the commercial SSF sample and could be attributed to the presence of the some oxide impurities such as calcium oxide (Coyle et al., 1981).

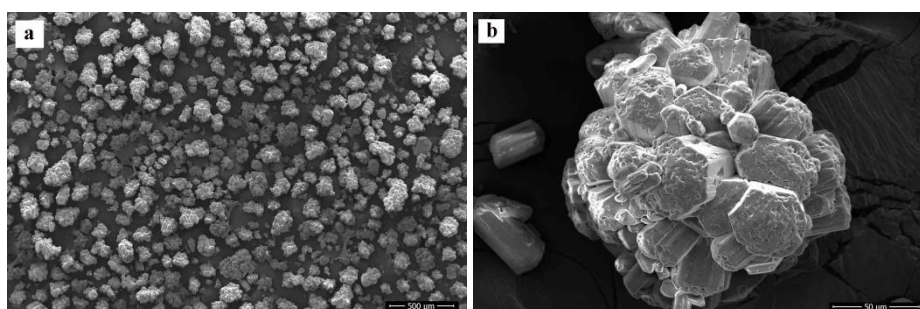


Figure 3. Scanning electron microscope images and morphology of sodium silicofluoride powder.

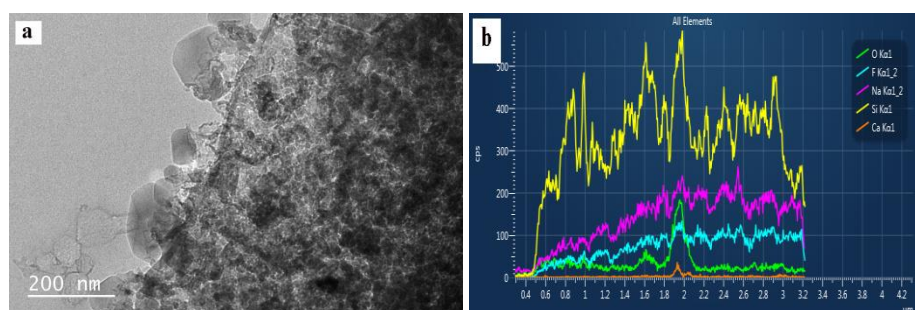


Figure 4. Transmission electron microscopy micrograph and EDAX chemical analysis of sodium silicofluoride.

The granular shape of the commercial SSF particle could have a good effect in the flowability in the dried stated which would be important in some process such as pressing or packaging. This property could also decrease the risk of ultra-fine powder and dust formation during processing. As it was explained before, the silicofluoride compounds of alkaline and earth-alkane elements could have some side-effects on human bodies after inhalation. This mater is important in some industrial application of commercial SSF material such as ceramic or metallurgical industries (Smith, 1985). The presence of the impurity elements such as calcium and oxygen were also characterized by EDAX line scan chemical analysis. Calcium could come from the neutralizing salt during the formation process of the sodium silicofluoride powder in the industrial process. The presence of oxygen could attribute to the presence of the calcium oxide impurity or the presence of surficial absorbed water from atmosphere during test (Jeong et al., 2010).

4. Conclusion

Sodium silicofluoride (Na_2SiF_6) is a well-known raw material candidate in ceramic, metallurgy and chemical industries which is used as a possible fluxing agent or fluorine source in various applications, products and synthesis methods. The understanding of the thermal and microstructural properties of this material could be helpful in the production of some kinds of ceramic materials such as glass-ceramics, enamel and opal products. In this research the thermal behavior (DTA/TGA/DTG) and microstructural properties (SEM/TEM) of a commercial sodium silicofluoride (SSF) powder were investigated. It is revealed the decomposition of the studied commercial sodium silicofluoride powder happens in the temperature range of 432-600 °C associated with an endothermic decomposition reaction and 55.46 wt.% mass loss by heating in air. The morphological studies using scanning electron microscope revealed the granular form of the SSF particles which are consisted from hexagonal shaped prisms and the existence of associated pores. Microstructural investigation using transmission electron microscopy was also proved the availability of the hexagonal shape of the crystallites. Also the EDAX line chemical analysis recorded the distribution of the main constitutional elements of the material as F, Na and Si. However, elements of oxygen and calcium were also detected and attributed to the possible existence of some kinds of impurity oxides such as CaO.

Acknowledgements

The authors would like to thank Research and Application Center (MERLAB, Kastamonu University, Kastamonu, Turkey) for experimental tests. This research was granted by KU-BAP01/2018-46 project of Kastamonu University, Kastamonu, Turkey.

References

- Andreeva, V. & Fekeldjiev, G. (1986) Use of nonconventional raw materials in ceramic production. *Ceramics International*, 12, 229-235.
- Arai, T. & Adachi, S. (2011) Mn-activated Na_2SiF_6 red and yellowish-green phosphors: A comparative study. *Journal of Applied Physics*, 110, 063514.
- Ciavatta, L., Iijlano, M. & Porto, R. (1988) Fluorosilicate equilibria in acid solution, *Polyhedron*, 7 (18), 1773-1779.
- Coyle, G. J., Tsang, T. & Adler, I. (1981) XPS studies of surface damages of transition metal fluorosilicates under argon ion bombardment. *Surface Science*, 112, 197-205.
- Hattab, F. N. (1987) Direct determination of fluoride in selected dental materials. *Dent. Mater.*, 3, 67-70.
- Jeong, H. L. & Huh, Y.D. (2010) Synthesis of hexagonal prisms and hexagonal plates of Na_2SiF_6 microcrystals. *Materials Letters*, 64, 1816-1818.
- Khan, M. S., Shahzadi, P., Alam, S., Javed, K., Shaheen, F., Naqvi, J. & Shahnaz, A. (2015) Development of heat resistant borosilicate glass doped with sodium silico fluoride compound. *Journal of Chemistry and Materials Research*, 4, 1, 13-18.
- Kumar, M., Nani Babu, M., Mankhand, T.R. & Pandey, B.D. (2010) Precipitation of sodium silicofluoride (Na_2SiF_6) and cryolite (Na_3AlF_6) from HF/HCl leach liquors of alumino-silicates, *Hydrometallurgy*, 104, 304-307.
- Smith, G. E. (1985) Toxicity of fluoride-containing dental preparations: A review. *The Science of the Total Environment*, 43, 41-61.
- Toure, A. O., Keinde, D., Sambe, F. M., Joseph, M. & Diop C. G. M. (2017) Use of a fluoride waste in the raw mix for clinker manufacturing. *American-Eurasian Journal of Scientific Research*, 12, 1, 1-6.
- Toure, A.O., Sambe, F.M., Koita, D., C.M.G., Diop, Sock, O. (2012) Processes for working-up an aqueous fluosilicic acid solution, *South African Journal of Science*, 108, 11/12, 1-5.
- Vanka, M. & Vachuska, J. (1980) Thermal decomposition of sodium hexafluorosilicate. *Thermochimica Acta*, 36, 387-391.
- Yeo, B. E., Cho, Y. S. & Huh, Y. D. (2016) Synthesis and photoluminescence properties of a red-emitting phosphor $\text{K}_2\text{SiF}_6:\text{Mn}^{4+}$ for use in three-band white LED applications, *Optical Materials*, 51, 50-55.
- Zhang, W., Jing, Q., Fang, Y., Chen, Z., (2017) Synthesis, structure and properties of nonlinear optical crystal Na_2SiF_6 , *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 10.1002/zaac.201700322.



Fosforesans Pigmentli Vitrikiye Sırları ile Enerji Tasarruflu Yüzeyler

The Energy Saving Surfaces for the Sanitary-ware Glaze by Means of the Phosphorescent Pigment

Nazım Kunduracı ¹, Zahide Bayer Öztürk ², Gülfem Binal ³

¹Bülent Ecevit Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak, TÜRKİYE

²Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir, TÜRKİYE

³Bartın Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 74110, Bartın, TÜRKİYE

Başvuru / Received: 31/07/2019

Kabul / Accepted: 23/09/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 04/11/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Malzemeler için enerji tasarrufu sağlayan yüzey uygulanması çok önemlidir ve son yıllarda kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu çalışmada, fosforesans pigment uygulaması vitrikiye sırlarında kullanılmıştır. Fosforesans pigmentlerin ve sırların kullanımı yüksek kalite sağlamak ve aynı zamanda müşterinin dikkatini çekmektedir. Bu çalışmada, üretilen fosforesans pigment, belirli oranlarda vitrikiye sır firine eklenmiştir. Vitrikiye bünyeler sırlandıktan sonra bileşimler endüstriyel fırınlarda pişirilmiştir. Standart vitrikiye sırına kıyasla homojen ve uzun ömürlü yüzeyler elde edilmiştir. Pigment kristalitesi ve mikroyapısı sırasıyla X-ışını difraksiyonu (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM-EDS) ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar %10 pigment ilavesi ile yeni fosforesans sır numunelerinin tatmin edici bir ışımaya gücü sergilediğini göstermektedir. İlk kez vitrikiye bir ürün fotoluminesans sır ile dekorlanmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Vitrikiye, Sır, Fosforesans”

Abstract

Application of the energy saving surfaces for materials is very important and researched extensively in recent years. In this study, application of phosphorescent pigment is used in sanitary-ware. The usage of phosphorescent pigments and glazes supplies high quality and also attracts customer's attention. In this study, produced phosphorescent pigment added into sanitary-ware glaze frit at certain ratios. After applying glazes on sanitary bodies, the compositions were fired in industrial kiln. In comparison with the standard sanitary-ware glaze, the homogenous and long lasting ability surface performed. The crystallinity of pigment and microstructure were evaluated by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM-EDS), respectively. The results highlighted the new sanitary-ware glaze samples with phosphorescent showed satisfactory phosphorescence ability can be achieved with 10 wt. % pigment addition. It is important to note that it is the first time sanitaryware was decorated with photoluminescent glaze.

Key Words

“Sanitary-ware, Glaze, Phosphorescence”

1. Giriş

Fosforlar ve uygulamaları üzerine yapılan araştırmalar, bilim ve teknolojiye çok çeşitli alanlarda bu malzemelerin kullanımına yöneliktir. Başlıca uygulamalarına örnekler; ışık kaynakları, görüntü aygıtları ve dedektör sistemleridir (Kaya ve ark. 2009). Fosforlar, güneş ışığından hem ultraviyole (UV) hem de görünür ışıkları emebilen ve karanlıkta enerjiyi belli bir dalga boyunda kademeli olarak yayabilen bir tür enerji depolama malzemesidir (Kaya ve Karasu 2012). Sonradan ışık yayma olarak adlandırılan fosforesans, malzemenin içsel veya dış kaynaklı kusur alanlarında foto-üretmiş elektronların ve/veya deliklerin yakalanmasının neden olduğu gecikmeli radyoaktif geri dönüş ile bir lüminesans anlamına gelir (Clabau ve ark. 2007). Uzun zamandır ZnS matrisi: Cu malzeme uygulamalarında sınırlı parlaklık ve sürelerde yeşil ışık yayımı olduğu bilinmektedir. Bu tür bir dezavantajı ortadan kaldırmak için mavi, yeşil, mavimsi-yeşil, sarımsı-yeşil renk yayımı gösteren SrAl₂O₄: Eu⁺², Dy⁺³ sistemi yapılan çalışmalarla geliştirilmiştir (Kaya ve ark. 2009). Geleneksel sülfid fosforlara göre yüksek parlaklık, iyi kimyasal dayanım, yavaş solma ve radyoaktif maddelerin olmaması gibi önemli avantajlara sahip olan Eu⁺², Dy⁺³ fosforları özellikle bazı uzun süreli fosforesans ender toprak elementi katkılı toprak alkali alüminat esaslı malzemeler olarak artan bir ilgi alanına sahiptir (Xiao ve ark. 2010). Bu tür pigmentlerin seramiklerde kullanımı ile ilgili az sayıda çalışma bulunmaktadır, ancak görünür ışıkları emdikten sonra karanlıkta parlayabilme özelliği, seramik ve cam ürünlerde kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Sarımsı-yeşil ve mavimsi yeşil pigmentler, Kaya ve Karasu tarafından laboratuvar çalışma koşullarında sentezlenmiş ve üretilmiştir (Kaya ve ark. 2009, Kaya ve Karasu 2012). Ayrıca, sırlı duvar karoları dekorasyonu için yeni bir saydam firit reçetesi geliştirmişler, duvar karosu dekorasyonlarında ve sanatsal cam uygulamalarında fosforesans pigmentleri kullanarak dekoratif ve fonksiyonel ürünler üretmişlerdir. Kaya ve ark. (2010) çalışmalarında dekoratif etkiler elde etmek için fosforesans etkili sarımsı-yeşil ve mavimsi-yeşil pigmentleri, ısı ile sertleşen polimerler grubundaki epoksi reçine ile karıştırarak sanatsal cam objeler ve düz camlar üzerine uygulamışlardır. Xiao ve ark. (2010) katı hal sinterleme yöntemini kullanarak yüksek parlaklıktaki saydam yüzey kristalli Eu⁺² ve Dy⁺³ katkılı stronsiyum alüminat borat cam-seramik üzerinde çalışmışlardır. Sırlar, nihai seramik ürününün estetik kalitesi, dayanıklılığı (kimyasal direnç, kir iticilik) ve fonksiyonel uygulamalar (fotokatalitik, antibakteriyel) açısından çok önemli bir rol oynamaktadır (Staneva ve Kasabov 1996, Reed 1993, Hupa ve ark. 2005, Ruiz ve ark. 2008, Qing ve ark. 2002). Sır özellikleri, hammadde ve oksit bileşimlerinin etkileri ve pişirim koşulları gibi çeşitli etkenlere bağlıdır (Eppler ve Eppler 2000). Bir sırın kalitesinin değerlendirilmesi, esas olarak, eriyebilirlik davranışına, reolojik özelliklerine, rengine, opaklığına ve ısıl genleşmesine dayanır (Bernaconi ve ark. 2014). Ticari sırlar arasında, fosfor içeren pigmentler oldukça ilgi çekicidir, ancak bu pigmentlerin seramik sırlarda kullanımına yönelik çalışmalar az sayıdadır. Sınırlı sayıda olan bu çalışmalardan birinde Katı hal reaksiyonu ile Eu⁺² ve Dy⁺³ katkılı stronsiyum alüminat sisteminde farklı pişirim sıcaklıkları ve sürelerinin etkisi değerlendirilmiştir (Yesilay Kaya ve ark. 2010). Sarımsı-yeşil fosforesans pigment ilaveli çini bünyelere uygulanan sırlara yine farklı sıcaklıkların uygulandığı bir diğer çalışmada 870-880°C'de pişirilen sır sistemlerinde ışıldamanın daha iyi olduğu, 900-910°C sıcaklık aralığında ise pigmentin bozunuma uğraması nedeniyle ışıldama özelliğinin düştüğü tespit edilmiştir (Gün ve ark. 2017). Farklı alanda yapılan bir diğer çalışmada, dış mekân cam çeşmelerde uzun ışıldama etkisini verebilmesi amacıyla katı hal reaksiyonu ile üretilen CaAl₂O₄ sisteminde uygun Nd ve Dy katkı oranları belirlenerek mor-mavi fosfor pigmentlerinin etkileri değerlendirilmiştir (El Kazazz ve ark. 2011). Bu çalışmanın amacı fosforesans pigmenti içeren vitrifiye sırlarının ısıl davranışları ile dekorasyon ve ışıldama özelliklerinin araştırılmasıdır. Bu amaçla, vitrifiye sır firitine belirli oranlarda fosforlu pigment eklenmiştir. Sıvılar vitrifiye bünyelere uygulandıktan sonra, bileşimler endüstriyel fırında pişirilmiştir. Bu çalışmada standart vitrifiye sırına kıyasla, homojen ve uzun süreli ışıldama gösteren yüzeyler elde edilmiştir.

2. Materyal ve Metod

Şeffaf firit, Kale Seramik Fabrikası (Çanakkale/Türkiye) tarafından sağlanmış, fosfor pigmenti ise Fosfortek San. Tic. Ltd. Şti.'den (Eskişehir/Türkiye) alınmıştır. Şeffaf firitin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Şeffaf firitin kimyasal bileşimi.

Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	BaO	ZnO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	B ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	PbO
1,34	1,90	14,84	1,25	0,88	3,46	8,94	0,09	3,39	63,86	0,03	0,01

Firit ve pigmentin tane boyutu dağılımı, lazer tane boyutu analiz cihazı kullanılarak ölçülmüştür (Malvern, Hidro 2000G). Firitin parçacık boyutu 1 mm, pigmentin ise 250 µm'dir. Firit bir bilyalı değirmende alümina bilyalar kullanılarak 45 dakika boyunca öğütüldükten sonra, eşzamanlı olarak, pigment aynı ortamda 2 saat süreyle öğütülmüştür. Firitin nihai boyutu 18 µm, pigmentin ise 50 µm'dir. Firit, çözelti hazırlamak için su ile karıştırılmıştır. Firit çözeltisinin viskozitesi, piknometre kullanılarak ölçülmüş ve 1650 g/l'de tutulmuştur. Fosfor pigmenti ağırlıkça %5, %10 ve %20 oranlarında şeffaf firit çözeltilerine eklenmiştir. Bu şekilde dört reçete hazırlanmıştır (Tablo 2). Ağırlıkça %0,1 oranında sodyum tripolifosfat (STPP) çözeltilere ilave edilmiştir. Pigment içeren firit çözeltileri püskürtme yöntemi kullanılarak vitrifiye ürünler üzerine uygulanmıştır. Örnekler 750°C/10sa., 20 dk. süre ile endüstriyel koşullar altında bir kamara fırınında pişirilmiştir. Pişirilen numunelerin kromatik koordinatları, Minolta CR-300 serisi kromometre ile ölçülmüştür. Isıl işlem altında firit davranışını ısı mikroskobu (Misura 332 ODHT-HSM 1600/80) ile incelenerek, sinterleme, yumuşama, küre, yarı küre ve erime sıcaklıkları belirlenmiştir. Toz haldeki numuneye, uygulanan ısı mikroskobu rejimi: 400 °C'ye 50 °C/dk. ısıtma hızı ile çıkılmış daha sonra 400 °C ila 1400 °C arasında 10 °C/dk.'lık bir ısıtma hızı kullanılmıştır. Sinterlemeden sonra referans sır ve pigment katkılı sır uygulanmış vitrifiye örneklerinin faz geçişlerini saptamak

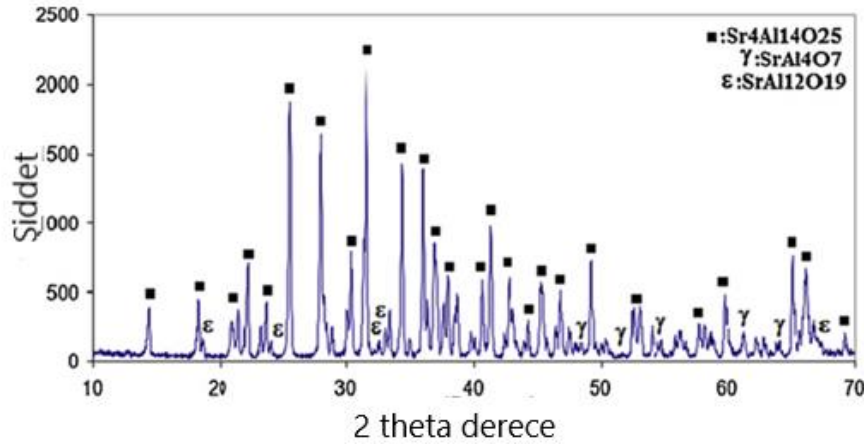
için, sırlı yüzeylere XRD analizi uygulanmıştır. Analizler Rigaku Rint 2000 serisi difraktometre ile $\text{CuK}\alpha$ ışınması kullanılarak 40 kV ve 30 mA'da gerçekleştirilmiştir, tarama hızı 2 °/dk'dır. 1 saat boyunca gün ışığında bekletilen sırlı vitrifiye ürünleri, ışık kaynağı kesildikten sonra hızlı bir zayıflama ile fosforesans etkisi göstermiştir. Sırlı numunelerin mikroyapı incelemeleri ve EDS analizi, taramalı elektron mikroskopunda (SEM) (Tescan, MAIA3 XMU) ikincil elektron (SE) görüntüleme modu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEM örneklerinin yüzeyleri, %5 hidroflorik asit (HF) çözeltisi ile 10 saniye süreyle dağlanmış ve ince bir altın-paladyum alaşımı tabakası ile kaplanmıştır.

Tablo 2. Sırların bileşimleri (birim ağırlığa göre).

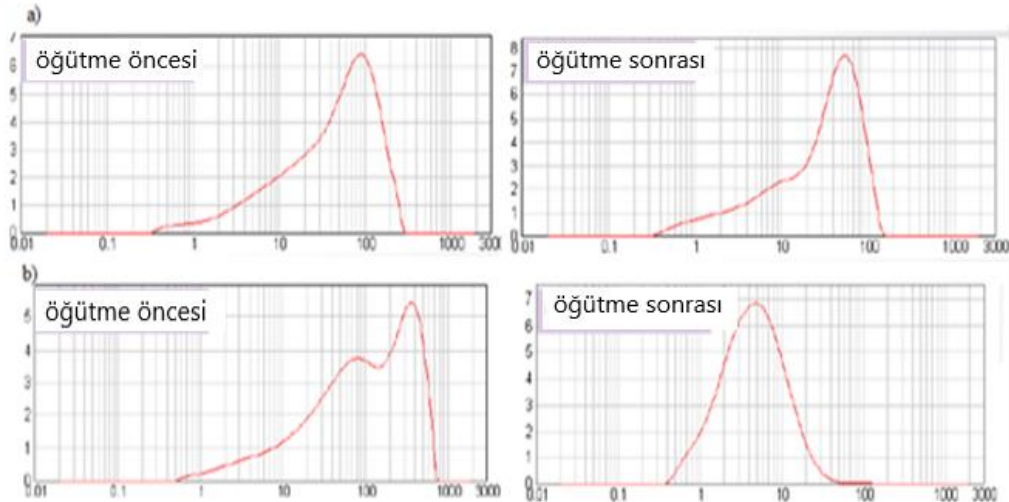
Sırlar	Std	P1	P2	P3
Firit	25	25	25	25
Su	75	75	75	75
Fosfor Pigmenti	-	5	10	20

3. Sonuçlar ve Tartışma

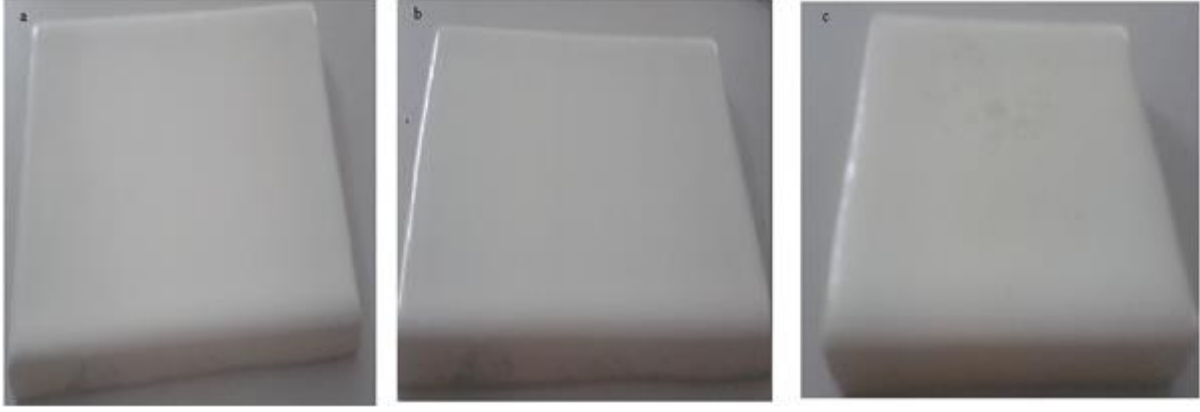
Mavimsi-yeşil fosfor örneğinin XRD paterni, Şekil 1'de gösterilmiştir. XRD sonuçlarına göre, başlıca kristal faz $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}$ fazıdır. Kaya ve Karasu (2012), yaptıkları çalışmada üretilen mavimsi-yeşil fosfor örneğinin morfolojisi ve uyarma-yayma spektrumlarını göstermişlerdir. Firit ve mavimsi-yeşil fosforun tane boyut dağılımı grafikleri Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'den görüldüğü gibi, firit ve mavimsi-yeşil fosforun tane boyutu dağılımı, öğütme sonrası istenen değerlere ulaşmıştır. Gün ışığında sırlı vitrifiye plakaların yüzey görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. Ağırlıkça %5 ve %10 pigment içeren sır uygulanmış plakalar daha pürüzsüz bir yüzey sergilemiştir. Fakat %20 pigment içeren sır uygulanmış numunede istenen pürüzsüz yüzey elde edilememiştir. Yüksek oranda pigment ilavesinin bağlı viskozite ve firitin olgunlaşma sıcaklığını etkileyerek böyle bir duruma neden olduğu tespit edilmiştir (Kaya ve Karasu 2012).



Şekil 1. Mavimsi-yeşil fosfor örneğinin X-ışını toz kırınım paterni (Kaya ve Karasu 2012).



Şekil 2. a) Firit ve b) mavimsi-yeşil fosforun tane boyut dağılımı grafikleri.



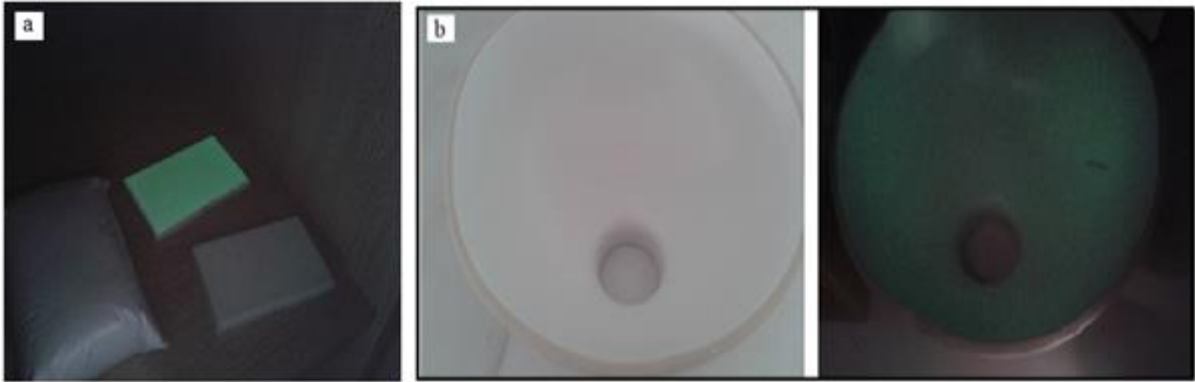
Şekil 3. Gün ışığında a) P1, b) P2, c) P3 fosfor pigmenti içeren sırlı vitrifiye plakalar.

L^* , a^* ve b^* parametreleri sırasıyla beyazlık, kırmızı veya yeşil ve sarı veya mavi renk eğilimlerini gösterir. Sırlı plakaların renk parametreleri (L^* , a^* , b^* değerleri) karanlıkta ölçülmüş ve elde edilen değerler Tablo 3'te verilmiştir. Sırlı plakaların, L^* değerleri sır bileşimindeki mavimsi-yeşil fosfor pigment miktarının artmasıyla azalmıştır. L^* değerlerindeki azalmanın nedeni, pigmentin $Sr_4Al_{14}O_{25}$, $SrAl_4O_7$ ve $SrAl_{12}O_{19}$ içeriğidir. Tablo 3'ten görüldüğü gibi, a^* değerleri sır içinde artan pigment miktarına karşı hassastır. Standart sırlı plakanın -0,44; ağırlıkça %20 pigment içeren sırlı plakanın b^* değeri 4,73'dir. Sıra ağırlıkça% 5 pigment ilavesi ile tatminkâr bir fosforesans gücüne ulaşamamış, ağırlıkça %20 pigment ilaveli sırlı plakada ise pürüzlü yüzey problemi gözlenmiştir. Bu nedenle, ilerleyen sırlama çalışmalarının ağırlıkça %10 pigment ilavesi ile gerçekleştirilmesi gerektiğine karar verilmiştir.

Tablo 3. Fosfor pigmenti içeren vitrifiye plakaların karanlıktaki renk parametreleri.

Reçete Kodu	Renk Değerleri		
	L^*	a^*	b^*
Std	90,02	-0,64	-0,44
P1	90,10	-0,85	1,18
P2	88,51	-1,33	2,26
P3	88,33	-3,28	4,73

Sırlı plakalar ile standart ve ağırlıkça %10 pigment içeren sırlı vitrifiyelerin karanlıktaki görüntüsü Şekil 4'te verilmiştir. Sırlı ürünün fosforesans süresi, muamele edilen gün ışığı süresinin yarısı kadardır, yani 30 dakika süreyle gün ışığına maruz bırakılan nihai sırlı ürün karanlıkta 15 dakika boyunca fosforesans kabiliyetini korumuştur.



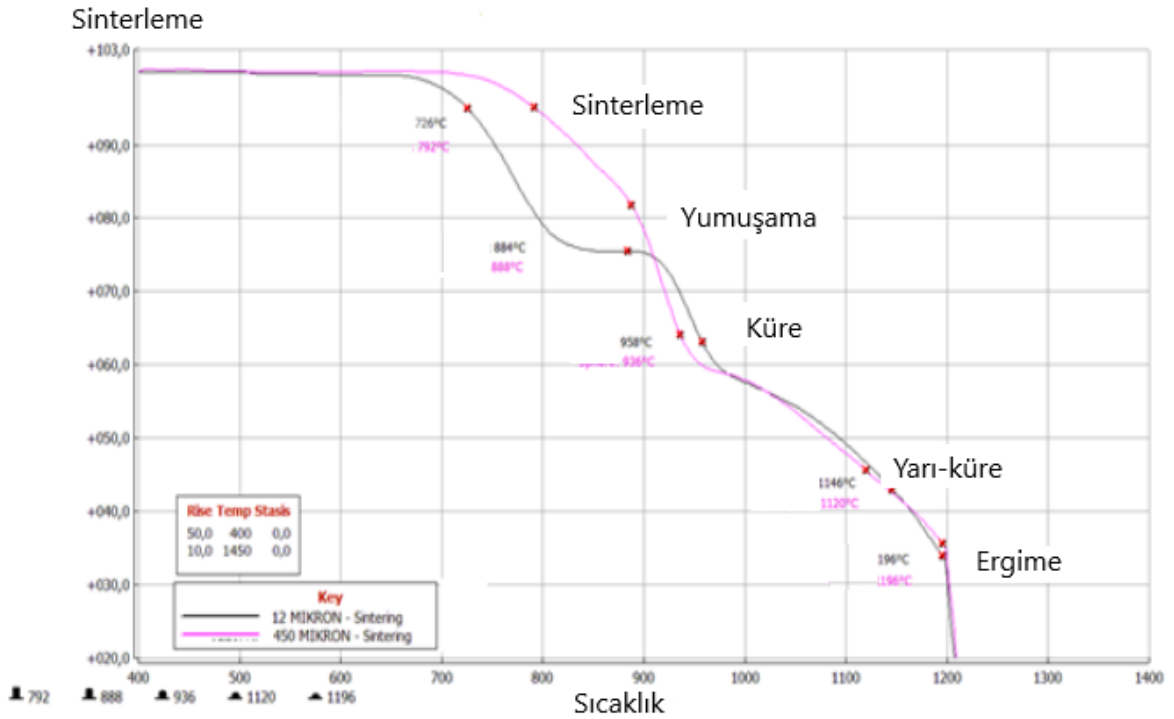
Şekil 4. Sırlı plakaların görünüşü a) Std ve sırlı b) std ve P2 karanlıkta.

Yaygın vitrifiye ürünlerle karşılaştırıldığında, bu ürün görünür ışıkları emdikten sonra karanlıkta parlayabilir, bu özelliği ile vitrifiye ürünlerin daha geniş ölçüde kullanılmasını sağlamaktadır. Fotoluminesans seramik ve cam malzeme doygunluğa ulaşana kadar çeşitli görünür ışıkları emebildiğinden, karanlıkta sürekli ışıdayabilir, ışığı geleneksel ışıldayan malzemenin (sülfat) ışığından on defa daha parlaktır. Malzeme radyoaktivite içermez, toksik değildir ve zararsızdır. Belirli seviyedeki parlak acil durum aydınlatması, enerji tasarrufu haricinde insanların acil durumlarda düzenli olarak tahliye edilmesine ve kargaşanın azaltılmasına yardımcı olabilir (Kaya ve ark. 2009). Şekil 6'da, 450 μm ve 12 μm tane büyüklüğüne sahip firitlerin karakteristik nokta ölçüm sonuçları görülmektedir. Şekil 5 yardımıyla belirlenen bu noktalar: sinterlemenin başlangıcı (numunenin başlangıç yüksekliğinin

% 1 azalması), sinterlemenin sonu (başlangıç yüksekliğinin %4-6 azalması), erime başlangıcı (başlangıç yüksekliğinin %12-12,5 azalması) ve altlık ile minimum taban temas alanına karşılık gelen erime noktası, başlangıç erime aşamasının sonu (başlangıç yüksekliğinin %16-23 azalması), yarı küre noktası (başlangıç yüksekliğinin %50 azalması) erime sonu noktası (numunenin başlangıç yüksekliğinin %54-56 azalması)'dır (Dumitrache ve Teoreanu 2006). Öğütülmüş firitin tüm kritik sıcaklıklarının standart firite göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum küçük tane boyutu artışının yoğunlaşma oranını arttırmasıyla açıklanabilir. Dar tane boyutu dağılımı yoğunlaşmayı arttırmaktadır (German 1985).

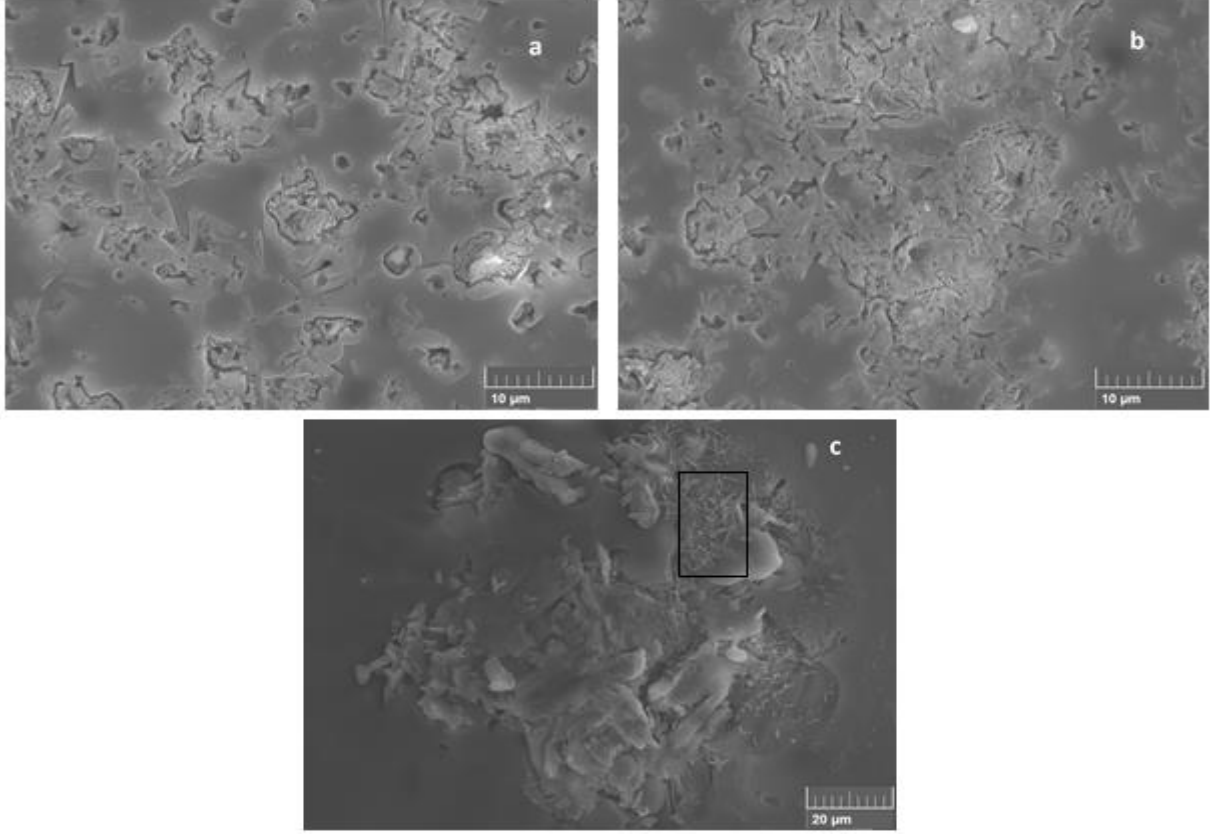


Şekil 5. Firitin ısı mikroskobu ile gözlemlenen karakteristik noktaları.

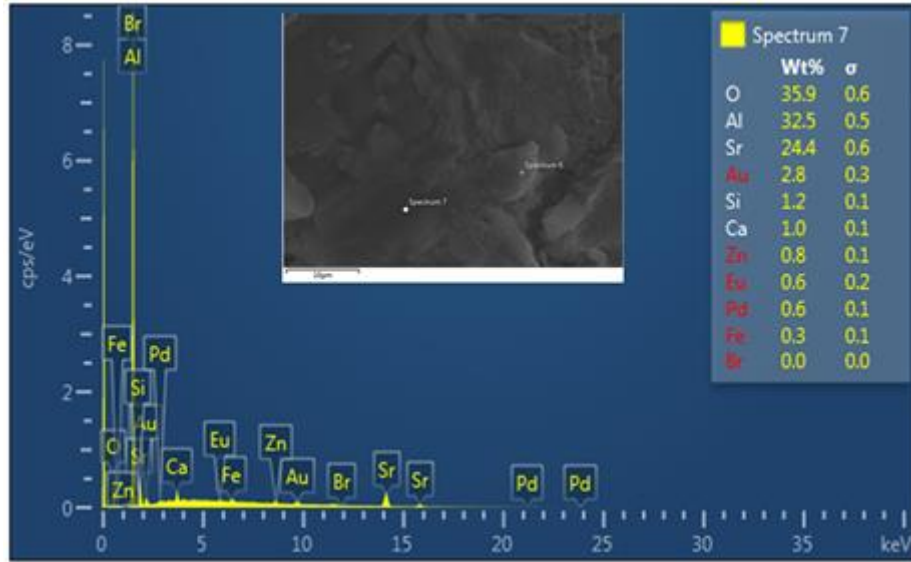


Şekil 6. Ön öğütme ve öğütme sonrası firitlerin ısı mikroskobu analizleri.

Ağırlıkça %5, %10 ve %20 fosfor pigmenti içeren sırlı yüzeyler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir (Şekil 7). Ağırlıkça %20 oranında fosfor pigmenti içeren sırlı yüzeye sahip vitrifiye plaka üzerinde EDX analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 8). Şekil 7 ve 8'de $Sr_4Al_{14}O_{25}$ ve $SrAl_2O_4$ kristalleri ile camsı fazı gözlemlenmiştir. $Sr_4Al_{14}O_{25}$ ve $SrAl_2O_4$ kristalleri düzensiz şekillere sahiptir ve bazıları camsı faza gömülmüştür. Şekil 7 (c) 'de müllitin iğne benzeri kristalleri de görülebilir.



Şekil 7. Ağırlıkça a) %5, b) %10, c) %20 fosfor pigmenti içeren vitrifiye ürünlerin sırlı yüzeylerinin temsili SEM görüntüleri (ikincil elektronlar).



Şekil 8. Ağırlıkça %20 oranında fosfor pigmenti içeren vitrifiye plaka sırlı yüzeyinin EDX analizi.

4. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, fosforesans pigmenti içeren vitrifiye sırlarının ısıl davranışı ve ışıltama kabiliyeti araştırılmıştır ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Ağırlıkça %10 pigment ilavesi ile pürüzsüz sır yüzeyi ve tatmin edici fosforesans kabiliyetine ulaşılmıştır.
- Fosforesans kabiliyeti esas olarak sır yüzeyindeki/üzerindeki stronsiyum alüminat kristallerinden ($Sr_4Al_{14}O_{25}$ ve $SrAl_2O_4$) kaynaklanmaktadır.
- İlk kez vitrifiye bir ürünün fotoluminesans sırla dekore edildiğini söylemek mümkündür. Fosforesans pigmentler kullanılarak daha fonksiyonel ve çekici vitrifiye ürünler elde edilebilir.

Referanslar

- Bernaconi, A., Marinoni, N., Pavese, A., Francescon, F., & Young, K. (2014). Feldspar and firing cycle effects on the evolution of sanitary-ware vitreous body. *Ceram. Int.*, 40, 6389-6398. doi: 10.1016/j.ceramint.2013.11.139
- Clabau, F., Rocquefelte, X., Jobic, S., Deniard, P., Whangbo, M.H., Garcia, A., & Mercier, T.L. (2007). On the phosphorescence mechanism in $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ and its codoped derivatives. *Solid State Sci.*, 9, 608-612. doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2007.03.020
- Dumitrache, R.L., & Teoreanu, I. (2006). Melting behaviour of feldspar porcelain glazes. *U.P.B. Sci. Bull.*, 68(3), 16.
- El Kazazz, H., Karacaoğlu, E., Karasu, B., ağatekin M. (2010). Production of violet-blue emitting phosphors via solid state reaction and their uses in outdoor glass fountain. *J. Am.Sci.* 7, 998-1004.
- Eppler, R.A., & Eppler, D.R. (2000). *Glazes and glass coatings*. Westerville, Ohio: Am. Cer. Soc.
- German, R.M. (1985). *Liquid Phase Sintering*. New York: Plenum Press.
- Gün, Y., Tasci, E., Pekkan K., Karasu, B. (2017). Farklı ticari firtilerin değişen sıcaklık aralıklarında fosforesans ışımaya etkisi. *Uluslararası hakemli mühendislik ve fen bilimleri dergisi*, 42-58.
- Hupa, L., Bergman, R., Fröberg, L., Vane-Tempest, S., Hupa, M., Kronberg, T., Pesonen-Leinonen, E., & Sjöberg, A.M. (2005). Chemical resistance and cleanability of glazed surfaces. *Surf. Sci.*, 584, 113-118. doi: 10.1016/j.susc.2004.11.048
- Kaya, S.Y., & Karasu, B. (2012). Process parameters determination of phosphorescent pigment added, frit-based wall tiles vitreous decorations. *Ceram. Int.*, 38, 2757-2766. doi: 10.1016/j.ceramint.2011.11.045
- Kaya, S.Y., & Karasu, B. (2012). Ceramics and glass with phosphorescent ability. *Ceram. Tech.*, 34, 94-99.
- Kaya, S.Y., Karasu, B., & Karacaoğlu, E. (2009). General review of application of phosphorescence pigments in ceramic industry. In: *Proceedings of SERES'09 I. International, Ceramic, Glass, Porcelain Enamel, Glaze and Pigment Congress*, Eskisehir, Turkey, p. 608-616.
- Kaya, S.Y., Karasu, B., & Karacaoğlu, E. (2010). Phosphorescence pigment applications in glasses. In: *Proceedings of the Camgeran Glass Symposium*, Eskisehir, Turkey, p. 41-44.
- Pekkan K., Gün, Y., Kamak K., TAşçı, E., Karasu B., (2017). Farklı renk veren fosfor ışıl pigmentler açısından düşük sıcaklık sıvı bileşimlerinin belirlenip çini bünyelerde uygulanması. *Teknik Bülten*, 46, 20-27.
- Qing, X., Wen, C., Feng, Z., & Run-Zhang, Y. (2002). A novel infrared radiant glaze exhibiting antibacterial and antifungal functions. *J. Wuhan Univ. Technol.*, 17, 11-12. doi: 10.1007/BF02852624
- Reed, J.S. (1993). *Introduction to principles of ceramic processing (second ed.)*. New York: Wiley, p. 395-474.
- Ruiz, O., Sanmiguel, F., Gargori, C., Galindo, F., & Monrós, G. (2008). Study of the photocatalytic degradability of ceramic glazes. In: *Proceedings of Qualicer*, Castellon, Spain. p. 15-31. Arkadaşım, konferans yazım şekillerini bulamadım:(
- Staneva, N., & Kasabov, I. (1996). The influence of electrolytes on the casting properties of porcelain slips. *Interceram.*, 45, 12-14.
- Xiao, L., Xiao, Q., Liu, Y., Ai, P., Li, Y., & Wang, H. (2010). A transparent surface-crystallized Eu^{2+} , Dy^{3+} co-doped strontium aluminate long-lasting phosphorescent glass-ceramic. *J. Alloy. Compd.*, 495, 72-75. doi: 10.1016/j.jallcom.2009.12.118
- Yeşilay Kaya, S., Karasu B., Kaya, G., Karacaoğlu, E.(2010). Effects of firing temperature and time on the luminescence of phosphors in strontium aluminate system Co-doped by Eu_2O_3 and Dy_2O_3 and Prepared by Solid State Reaction Processing. *Adv.in Sci. and Tech.*, 62, 82-87.



Dört Silindirli İçten Yanmalı Bir Motorun Düşey Titreşimine Sebep Olan Kuvvetlerin Analizi

Analysis of the Forces Causing Vertical Vibration of a Four-Cylinder Internal Combustion Engine

Fatih Celtek*¹, Hakan Arslan¹

¹Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, 71451 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru / Received: 01/07/2019

Kabul / Accepted: 27/10/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 04/11/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Motor bloğunda, motorun çalışması esnasında üç eksen de titreşimler oluşmaktadır. En yüksek titreşim genlikleri, pistonun hareketinden dolayı düşey eksen de ölçülmektedir. Bu çalışmada, 4 silindirli benzinli bir motorun düşey eksen de titreşimine sebep olan kuvvetler incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle; piston, krank ve biyel için kütle indirgemeleri yapılmıştır. Pistonun ve krank milinin; konum, hız ve ivmeleri krank açısının fonksiyonu olacak şekilde tanımlanmışlardır. Elde edilen bu verilerle sistem üzerinde oluşan atalet ve sürtünme kuvvetleri belirlenmiştir. Piston, krank ve biyel için ayrı ayrı serbest cisim diyagramları çizilmiş ve dinamik kuvvet analizleri yapılmıştır. Analiz sonucu belirlenen kuvvetlerin, motor bloğu titreşimine etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Dört Silindirli Motor, Dinamik Kuvvet Analizi, Motor Titreşimleri”

Abstract

On the engine block, vibrations occur in three axes during the operation. The highest vibration amplitude is measured in the vertical axis because of the motion of the piston. In this study, forces causing vibration in the vertical axis of the four-cylinder gasoline engine were investigated. For this purpose, firstly mass reduction has been done for piston, crankshaft and connection rod. Position, velocity and acceleration of piston and piston rod have been defined as the function of the angle of the crankshaft. By the obtained these data, inertia and friction forces that occur on the system has been determined. For the piston, crankshaft and connecting rod, free body diagrams were drawn respectively and dynamic forces analysis were carried out. The determined forces as a result of the analysis were investigated for the effects on engine block vibrations.

Key Words

“Four-Cylinder Engine, Dynamic Force Analysis, Engine Vibrations”

1. Giriş

Teknolojide yaşanan hızlı gelişmeler ve otomotiv sektöründe artan yüksek verimlilik, performans ve konfor isteği; özellikle de motor konusu üzerinde birçok araştırmaya ve tasarıma zemin hazırlamıştır. Bu araştırma konularından en önemlilerinden biri de motorun çalışması esnasında şasi üzerinde oluşturacağı titreşimin ve kaynaklarının incelenmesi ve azaltılması çalışmalarıdır. Motor titreşimi iki temel sebepten dolayı incelenmesi gereken bir konudur. İlki, motor bloğu üzerinde oluşan titreşimin tüm araç üzerine iletilmesiyle, mekanik olarak araçta oluşturabileceği olumsuzluklardır. İkincisi ise, yolcu konforudur.

Motorunda oluşan titreşimin kaynağı, silindir içerisindeki yanma işlemi ve bu işlem sonucunda piston – krank ve biyel mekanizması üzerinde oluşan kuvvetler ve momentlerdir. Yanma sonrasında oluşan ısı enerjisi, silindir içerisindeki gazların sıcaklık ve basıncını artırmakta ve bu gaz basıncı, silindir yüzeyinde gaz kuvveti olarak etki etmektedir. Gaz kuvveti, piston hareketinin ana kaynağı olan kuvvettir. Bu sebeple, içten yanmalı motorlarda, motor yükü ve yanma frekansı ile bağlantılı olarak, en güçlü titreşim sinyallerinin ateşleme sırasında oluşan yüksek basınçtan kaynaklandığı ve silindirler üzerinden ölçülebildiği tespit edilmiştir (Barelli, Bidini, Buratti, & Mariani, 2009; Erkaya, Su, & Uzmay, 2007; Manieniyan & Sivaprakasam, 2013; Pulkrabek, 2001). Ayrıca pistonun hareketi esnasında, piston yüzeyine silindir içerisinden bir sürtünme kuvveti de etki eder. Bu kuvvet, motorun ilk hareketi esnasında yüzeyler arasında değme basıncı ile orantılı olarak kuru sürtünmedir. Daha sonraki hareketlerde yağlama yağının da etkisiyle sürtünme kuvveti hidrodinamik sürtünme kuvveti halini alır (Guzzomi, Hesterman, & Stone, 2007). Pistona etkiyen hidrodinamik sürtünme kuvveti, piston hızının bir fonksiyonu olarak belirlendiği için, bu kuvveti incelerken aynı zamanda piston hızının yönü de belirlenmelidir.

Piston sürekli doğrusal hareket yaparken, krank mili dairesel ve biyel kolu genel düzlemsel hareket yapmaktadır. Bu sebeple krank-biyel-piston üçlüsü ve dolayısıyla tüm sistem üzerine, değişken atalet kuvvetleri / momentleri ve merkezci kuvvetler etki etmektedir. Bu kuvvetler ve gaz kuvvetlerinin bileşkesi olarak, krank mili yataklarında oluşan yatak kuvvetleri blok titreşiminde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca krank-biyel mekanizmasına etki eden kuvvetler ve bunların momentleri krank açısına bağlı sürekli değişim gösterirler. Kuvvetler ve momentler dengelenmedikleri sürece, motor gövdesinde titreşime ve motorun devrilmesine neden olabilirler. Titreşim, bağlantı noktalarından motorun bloğunu taşıyan aksama geçerken aynı zamanda enerji kaybına ve gürültü oluşumuna da neden olur (Çetinkaya, 1999; Uicker, Pennock, & Shigley, 2003).

Motorun alt kısmında, motor kaynaklı titreşimleri sönmek ve şasiye aktarımını en aza indirmek amacıyla motor takozları veya motor kulağı olarak isimlendirilen parçalar yer almaktadır. Geneli kauçuk esaslı takozlar olmakla birlikte hidrolik elemanlar da kullanılmaktadır. Bu elemanlar taşıtın geneli üzerinde, malzeme yorulması ile bazı parçaların hasarı, vidalı bağlantıların gevşemesi ve diğer mekanik ve elektronik aksamaların bozulmasının önüne geçilmesi açısından gereklidir. Ayrıca yolcu ve sürücü konforu sağlanması bakımından önemlidir (Karabulut, Öztürk, & Çınar, 2011). Takozlar, motor bloğunun her iki yanında yay ve sönmü kuvveti oluşturarak sisteme etki ederler. Düşey eksen ve krank eksenini etrafında oluşan burulma titreşimlerinin hareket denklemlerinin belirlenmesinde gereklidirler.

Bunların yanı sıra krank milinin balanssızlığından da kaynaklı kuvvetler düşey ve yatay eksenlerde titreşime sebep olabilirler. Uygun balans ağırlıkları kullanılması ve bu ağırlıkların krank ekseninden ideal uzaklıkta olması düşey eksen üzerinde oluşan titreşimi azaltabilir. Fakat bu hususla birlikte yatay eksen üzerinde oluşabilecek titreşimin de dikkate alınması gerekmektedir (Öztürk & Karabulut, 2012).

Motorlarda piston, krank ve biyel kütlelerinin dinamik olarak eşdeğer kütlelerle değiştirilmesi dinamik kuvvet analizi yapılırken büyük kolaylık sağlayacaktır. Piston kütlesi, piston üzerinde yer alan segmanların kütlesi ve biyel ile piston arasındaki bağlantı elemanlarının toplam kütlesi; piston pimi üzerinde yer alan noktasal bir kütle indirgenebilir. Genel düzlemsel hareket yapan biyel kütlesinin, karmaşık ve göreceli olarak daha zor dinamik analizini basitleştirmek adına, yaklaşık üçte ikisi krank pimi üzerine geriye kalan üçte birlik kısmı ise piston pimi üzerine paylaştırılmalıdır. (Söylemez, 2017; Uicker et al., 2003). Böylelikle, biyel krank üzerine dağıtılan kütlesi sadece dairesel, piston üzerine dağıtılan kütlesi ise sadece öteleme hareketi yapacaktır. Dinamik eşdeğerliliği sağlamak için toplam kütle, ağırlık merkezinin konumu ve toplam eylemsizlik momentinin değişmemesi gerekir (Metallidis & Natsiavas, 2003; Pasricha & Hashim, 2006; Zweiri, Whidborne, & Seneviratne, 2001). Krank mili ise, statik ve dinamik olarak dengede olması için biyel koluna ters yönde bulunan denge ağırlıkları ile üretilir. Böylece krank milinin ağırlık merkezi, ana yatak muylusu üzerinden geçen eksen üzerinde yer almaktadır.

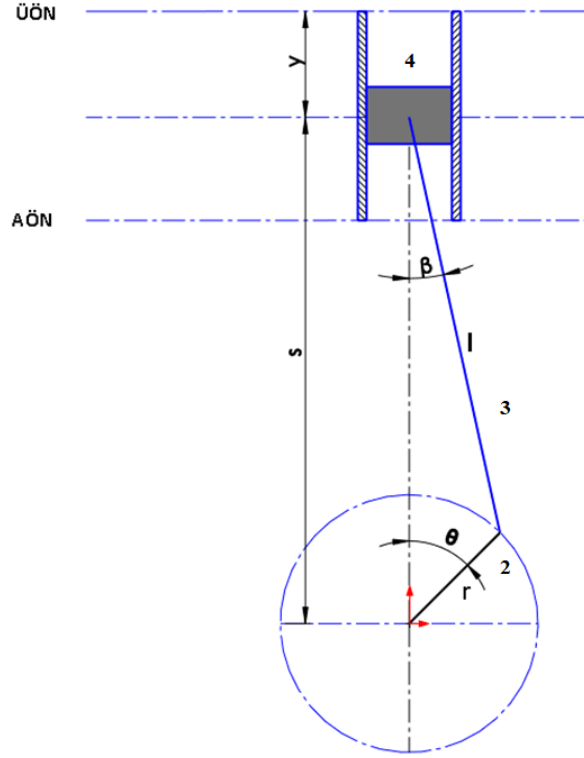
Bu çalışmada dört silindireli içten yanmalı motorlarda, düşey eksen üzerinde oluşabilecek titreşimlerin kaynağı olan kuvvetler incelenmiştir. Öncelikle motorun en önemli elemanlarından olan pistonun kinematik analizi yapılmış ve krank açısının fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Ardından piston, krank ve biyel üzerine etki eden tüm kuvvetler ve bu kuvvetlerin yön değişimleri irdelenmiş, D’Alembert prensibine göre vektörel olarak ortaya konmuştur. Motor bloğuna etki eden gaz basıncı kuvvetleri ve yatak kuvvetleri ve motor takozundan kaynaklanan yay ve sönmü kuvvetleri de belirlenerek, blok üzerine etki eden tüm kuvvetler tespit edilmiştir. Düşey eksen üzerinde oluşan titreşimin, hangi krank açısı aralıklarında incelenmesi gerektiği belirlenmiştir.

2. Dinamik Kuvvet Analizi

2.1. Pistonun ve Krank Milinin Pozisyonlarının Belirlenmesi

Motorun her bir çevriminde etki eden tüm kuvvetler, yön ve büyüklük bakımından sürekli değişmektedirler. Bu nedenle, bütün kuvvetlerin ve yer değiştirme ifadelerinin krank açısının bir fonksiyonu olarak ifade edilmeleri büyük avantaj sağlayacaktır.

Sistem üzerindeki kuvvetlerin analizinden önce, krank milinin ve pistonun konumlarının belirlenmesi gerekmektedir. Yapılan bu çalışmada tüm hareket ve kuvvet ifadeleri krank milinin θ açısının fonksiyonu olarak ifade edileceğinden dolayı, aşağıda elde edilen eşitliklerde ana değişken θ olacaktır. β açısı, biyelin düşey eksenle yaptığı açığı temsil etmektedir. Tüm gösterimlerde ve işlemlerde motora ait elemanlardan; 1 no'lu uzuv motor bloğunu, 2 no'lu uzuv krank milini, 3 no'lu uzuv biyel kolunu, 4 no'lu uzuv pistonu ifade etmektedir. Krank milinin saat yönünde döndüğü ve piston hareketinin başlangıç noktası, üst ölü nokta olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 1. Pistonun ve Krank Milinin Pozisyonları

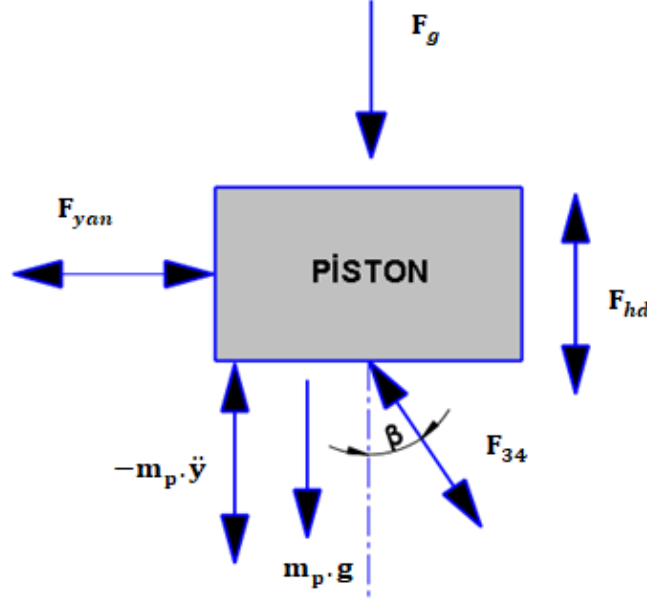
Şekil-1'e göre, geometrik ve trigonometrik eşitlikler kullanılarak pistonun ÜÖN'ya göre herhangi bir andaki konumu; krank milinin düşey eksenle yaptığı açının bir fonksiyonu olarak eşitlik 1'de belirlenmiştir.

$$y = l + r - \sqrt{l^2 - r^2} \cdot \sin^2 \theta - r \cdot \cos \theta \quad (1)$$

2.2. Piston Üzerine Etki Eden Kuvvetler ve Kütle İndirgenmesi

Pistonun ağırlık merkezi, biyel-piston bağlantısının gerçekleştiği nokta olarak işlemlerde kabul edilmiştir. Ayrıca, piston kütesinin değeri; pistonun gerçek kütesi, biyel ile piston arasındaki bağlantı elemanlarının toplam kütesi m_p , piston üzerindeki segmanların kütesi ve biyelin pistonu indirgenen kütesinin toplamını ifade etmektedir. Piston kütesi belirlendikten sonra, pistonu etkileyen kuvvetler incelenebilir.

Piston üzerine düşey eksende; gaz kuvveti, hidrodinamik sürtünme kuvveti, biyel kolunun piston üzerine uyguladığı kuvvet, atalet kuvveti ve ağırlık kuvveti etki etmektedir. Piston üzerine etki eden F_{34} , F_{hd} , F_{yan} , $-m_p \cdot \ddot{y}$ kuvvetlerinin yönleri ve büyüklükleri sürekli değiştiğinden, kuvvet vektörleri çift yönlü oklar ile Şekil-2'de gösterilmiş ve D'Alembert ilkesine göre, toplam kuvvet eşitliği vektörel toplam şeklinde yazılmıştır.



Şekil 2. Piston Üzerine Etki Eden Kuvvetler

Düşey ekseninde toplam kuvvet eşitliği ifadesi yazıldığında;

$$\Sigma \vec{F}_y = 0 \Rightarrow \vec{F}_g - \overline{m_p \cdot \ddot{y}} + \vec{F}_{hd} + \vec{F}_{34} \cdot \cos\beta + \overline{m_p \cdot g} = 0 \quad (2)$$

2 denkleminde bulunan \vec{F}_g kuvveti, silindir içerisindeki gazların basıncından kaynaklanan kuvvetlerin genel ifadesidir. Silindirdeki gaz basınçları, tüm yüzeylerde etkin olduğundan, hem piston üzerine hem de motor bloğu üzerine gaz kuvveti tesir etmektedir. Bu kuvvet, pistonun hareketine sebep olduğu gibi, blok üzerinde de titreşime sebebiyet vermektedir. Silindir içerisinde her bir strok için farklı basınç seviyelerine ulaşıldığından, gaz kuvveti de stroka göre değişiklik göstermektedir. En genel haliyle gaz kuvveti,

$$\vec{F}_g = P_y \cdot A_{piston} \quad (3)$$

Burada P_y pistonu etkileyen basınç, A_{piston} da basıncın etki ettiği piston kesit alanıdır.

Motorun ilk çalışması sırasında, piston ile silindir yüzeyleri arasında kuru sürtünme kuvvetleri oluşmaktadır. İlk hareketin ardından, piston-silindir arasındaki yüzeyde yağlama yağının devreye girer ve hidrodinamik sürtünme başlar. Hidrodinamik sürtünme kuvveti, pistonun hareketine ters yönde etki eden ve piston hızıyla ve dinamik viskozite ile doğru orantılı olan bir kuvvettir. Aşağıdaki eşitlikle hesaplanır;

$$\vec{F}_{hd} = \mu \cdot A_p \cdot \vec{y} \quad (4)$$

Hidrodinamik sürtünme kuvvetini belirlemek için, piston hızının belirlenmesi gerekir. Bunun için de piston konum denkleminin (1 numaralı denklem) zamana göre birinci türevi alınır; pistonun hızı \dot{y} ifadesini θ 'nın fonksiyonu olarak yazabilmek mümkün olacaktır.

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = \dot{\theta} \cdot \left(\frac{r^2 \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta}{\sqrt{l^2 - r^2 \cdot \sin^2\theta}} + r \cdot \sin\theta \right) \quad (5)$$

Hız ifadesinin belirlenmesiyle, krank açısının bir fonksiyonu olarak hidrodinamik sürtünme kuvveti aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\vec{F}_{hd} = \mu \cdot A_p \cdot \dot{\theta} \cdot \left(\frac{r^2 \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta}{\sqrt{l^2 - r^2 \cdot \sin^2\theta}} + r \cdot \sin\theta \right) \quad (6)$$

Piston üzerindeki atalet kuvvetinin yönü ve büyüklüğü ise piston ivmesine göre değişir. Bu sebeple önce piston ivmesi tespit edilmelidir. Bunun için de denklem 1'in zamana göre ikinci türevi alınır; piston ivmesi \ddot{y} , θ 'nın fonksiyonu olarak elde edilir.

$$\ddot{y} = \frac{d^2y}{dt^2} = \ddot{\theta} \cdot \left(\frac{r^2 \cdot \cos^2 \theta - r^2 \cdot \sin^2 \theta}{\sqrt{l^2 - r^2 \cdot \sin^2 \theta}} + \frac{r^4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{\sqrt{(l^2 - r^2 \cdot \sin^2 \theta)^3}} + r \cdot \cos \theta \right) \quad (7)$$

D'alembert prensibine göre, atalet kuvveti;

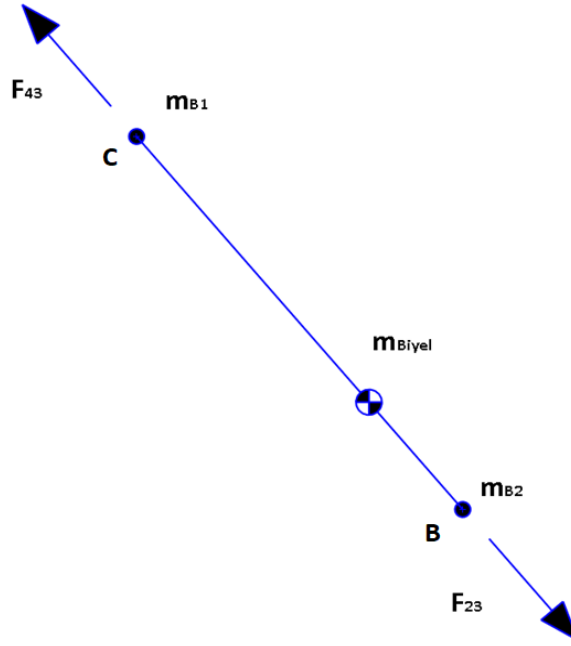
$$\overrightarrow{F_{\text{atalet}}} = -\overrightarrow{m_p \cdot \ddot{y}} = -m_p \cdot \ddot{\theta} \cdot \left(\frac{r^2 \cdot \cos^2 \theta - r^2 \cdot \sin^2 \theta}{\sqrt{l^2 - r^2 \cdot \sin^2 \theta}} + \frac{r^4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{\sqrt{(l^2 - r^2 \cdot \sin^2 \theta)^3}} + r \cdot \cos \theta \right) \quad (8)$$

Pistonun serbest cisim diyagramında gösterilen F_{34} kuvveti, biyel kolunun piston üzerindeki tepki kuvvetidir ve yönü biyel doğrultusundadır. Yani β açısıyla, pistonu etkiler. F_{yan} ise, biyel tepki kuvvetinin yani F_{34} kuvvetinin yatay bileşenine eşittir. Silindirin yan yüzeyinden piston üzerine gelen yatay tepki kuvvetidir.

2.3. Biyel Kolu Üzerine Etki Eden Kuvvetler ve Kütle İndirgenmesi

Biyel kolu, hem öteleme hem de dönme hareketi yapan bir uzundur. Bu özelliği sebebiyle hareketini incelemek pek kolay değildir. Yapılacak işlemleri kolaylaştırmak amacıyla kütle indirgenmesi yolu seçilmiş ve işlem yükü bu şekilde hafifletilmiştir. Biyelin piston üzerine indirgenmiş kütlesi, pistonla birlikte doğrusal hareket yaparken; krank üzerindeki kısmı ise, krank miliyle beraber dairesel hareket yapacaktır. Bu şekilde biyelin hareketi diğer iki uzvun yaptığı hareket üzerinden incelenmiştir. Biyelin piston pimi eksenine üzerine dağıtılmış olan kısmının kütlesi (m_{B1}), toplam biyel kütesinin yaklaşık olarak %30'una tekabül etmektedir (Çetinkaya, 1999; Söylemez, 2017).

m_{B1} kütlesi, toplam piston kütlesi hesaplanırken hesaplamalara dahil edilmiş ve etkisi piston hareketiyle birlikte incelenmiştir. m_{B2} kütlesi ise biyel kolunun, krank muylusu üzerine B noktasına indirgenen, noktasal bir kütle olarak değerlendirilmiştir. Hesaplamalarda, biyel kolunun kütlesi diğer uzuvlara dağıtıldığından, kütleli bir uzuvmuş gibi işlemler yapılmıştır.



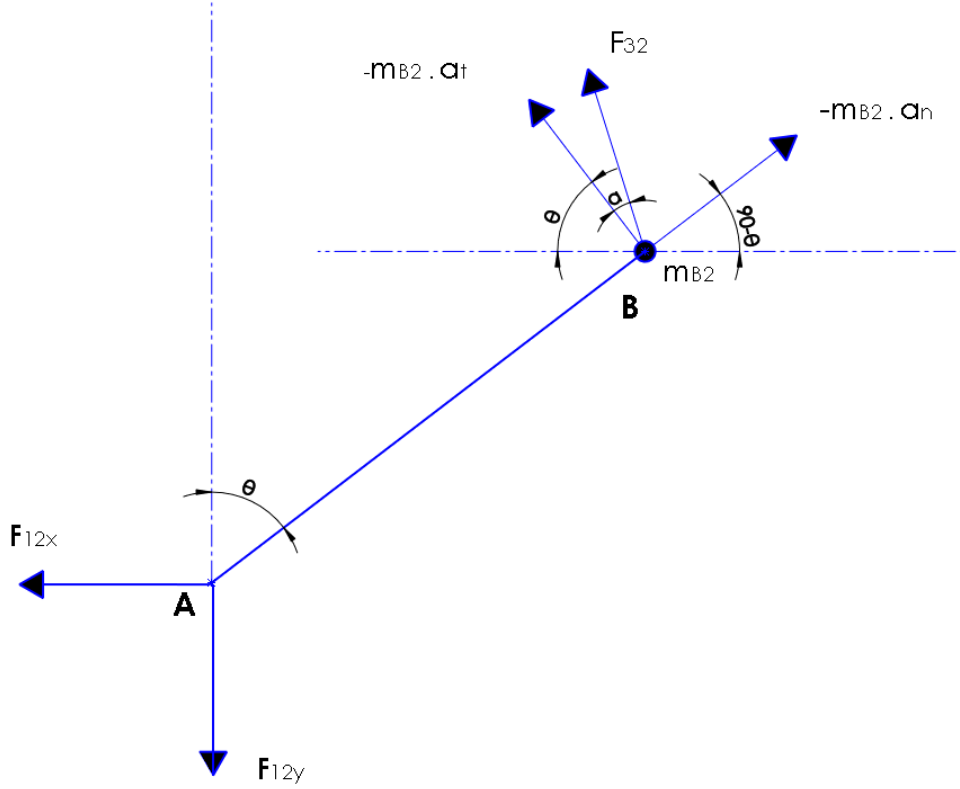
Şekil 3. Biyel Üzerine Etki Eden Kuvvetler

Biyel bir tarafta pistonu diğer tarafta ise krank mili üzerine, bağlantı elemanlarıyla monte edilmiştir. Üzerine etkiyen kuvvetler, diğer uzuvlardan kaynaklı tepki kuvvetleridir.

$$\Sigma \vec{F} = 0 \Rightarrow \vec{F}_{43} + \vec{F}_{23} = 0 \quad (9)$$

2.4. Krank Mili Üzerine Etki Eden Kuvvetler ve Kütle İndirgenmesi

Krank mili, dengelemeyi sağlamak için krank-biyel muylusuna ters yönde denge ağırlıklarıyla birlikte üretilir. Krank kütlesi ve dönme eksenine göre simetrik olan dengeleme kütlelerinin ağırlık merkezinin konumu, krank dönme merkezi olan A noktası olarak kabul edilebilir (Uicker et al., 2003). Bu kütlelerden kaynaklı herhangi bir atalet kuvveti veya ağırlık kuvveti krank miline etki etmez. Yapılacak diğer işlemlerde ise krank üzerinde simetrik olmayan kütle olmadığı varsayılmıştır. Bu kabulden yola çıkarak, krank mili üzerinde kütle olarak, sadece biyel kolunun kranka indirgenmiş kütlesi olan (m_{B2}) kütle kalır. Krank mili üzerine etki eden kuvvetler, temsili olarak Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Krank Mili Üzerine Etki Eden Kuvvetler

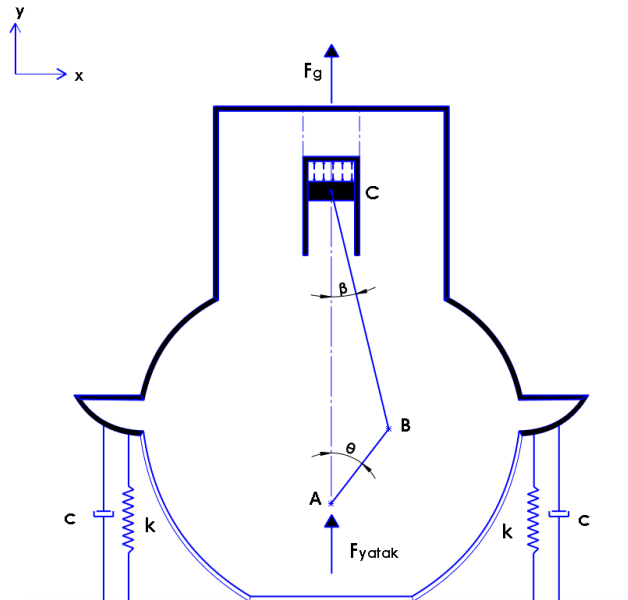
Şekil 4'e göre krank mili üzerine A noktasında; yatak tepki kuvvetleri, B de ise; m_{B2} kütle sinin normal ve teğetsel atalet kuvvetleri ile biyel kolunun krank üzerindeki tepki kuvveti etki etmektedir.

y ekseninde D'alembert prensibine göre toplam kuvvet eşitliği yazılarak aşağıdaki vektörel toplam ifadesi elde edilir.

$$\Sigma F_y = 0 \Rightarrow \vec{F}_{12}^y + (-m_{B2} \cdot \vec{a}_n) \cdot \sin(90 - \theta) + \vec{F}_{32} \cdot \sin(\alpha + \theta) + (-m_{B2} \cdot \vec{a}_t) \cdot \sin(\theta) = 0 \quad (10)$$

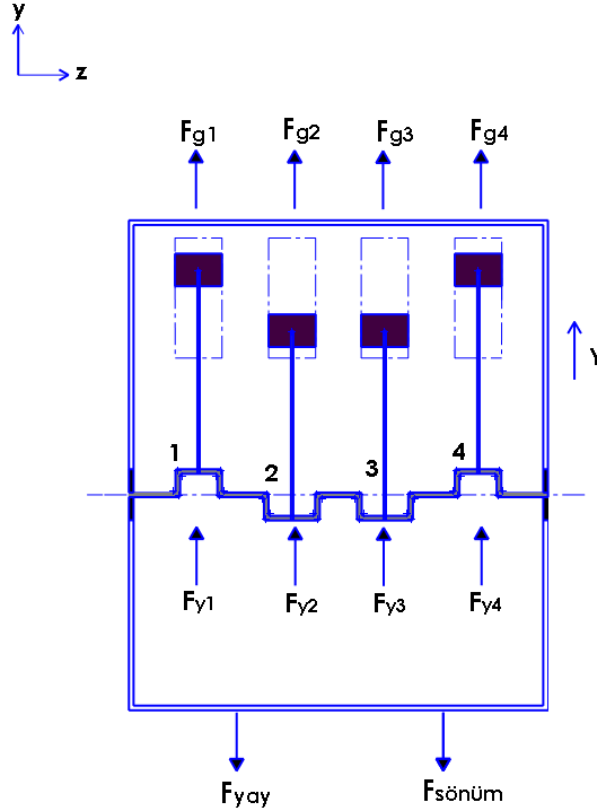
3. Motor Bloğuna Etki Eden Kuvvetler ve Hareket Denklemi

Motor bloğunun önden görünüşü Şekil 5'te verilmiştir. Blok üzerine etki eden temel kuvvetler, silindirler içerisinde oluşan bileşke gaz kuvveti ve buna bağlı olarak oluşan krank yataklarına etki eden bileşke yatak kuvvetidir. Bu kuvvetlerin yanında; bloğu şasiye bağlayan motor kulaklarından kaynaklı yay kuvveti, sönüm kuvveti de bloğa etki eden diğer kuvvetlerdir.



Şekil 5. Motor Bloğunun Önden Görünümü

Şekil 6' da motor bloğunun yandan görünüşü verilmiştir. Blok üzerine y ekseninde etki eden ve yönleri temsili olarak verilmiş kuvvet vektörleri görülmektedir.



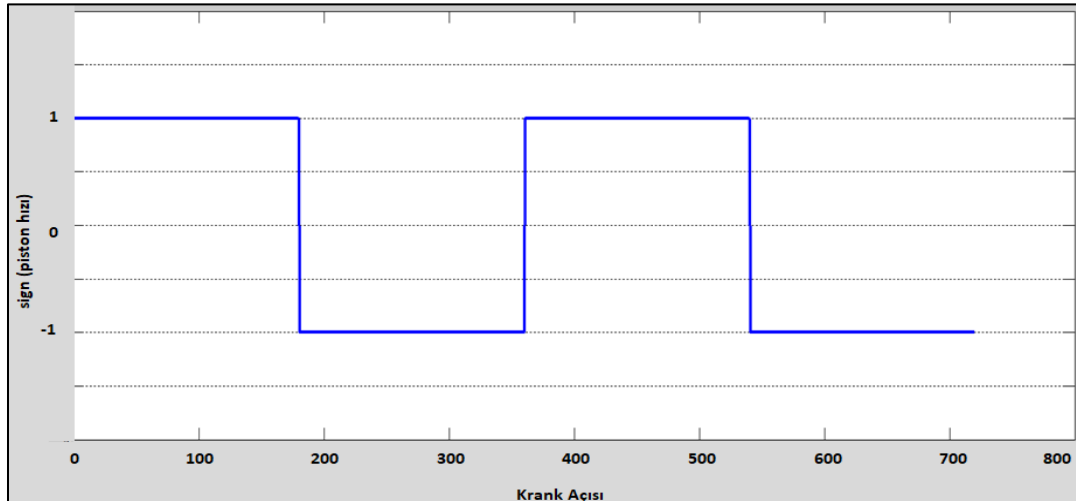
Şekil 6. Motor Bloğunun Yandan Görünüşü ve Blok Üzerine Etki Eden Kuvvetler

Motor bloğunun üst kapağına, silindirler içerisindeki gaz basınçları sebebiyle oluşan gaz basınç kuvvetleri etki etmektedir. Motorun çalışması esnasında herhangi bir anda, 4 piston da farklı stroklarda bulunurlar. İlk piston genişleme strokundaydı, ikincisi egzoz, üçüncüsü sıkıştırma ve dördüncü piston emme strokundaydı. Bu sebeple, bloğa etkiyen bileşke gaz kuvveti, her zaman bu 4 gaz kuvvetinin vektörel toplamı şeklinde ifade edilir. Bu bileşke kuvvet, bloğu harekete zorlamaktadır.

$$\vec{F}_{gaz} = \sum \vec{F}_g = \vec{F}_{g1} + \vec{F}_{g2} + \vec{F}_{g3} + \vec{F}_{g4} \quad (11)$$

\vec{F}_g kuvvetlerinin analitik olarak bulunabilmesi için 2 no'lu eşitlikten faydalanmak gerekir. Ancak, öncelikle bu ifadede yer alan hidrodinamik sürtünme ve atalet kuvvetlerinin yönlerinin belirlenmesine ihtiyaç duyulur. Pistona etki eden hidrodinamik sürtünme kuvvetinin yönünün belirlenmesi için, piston hızının işaretinin incelenmesi gerekir.

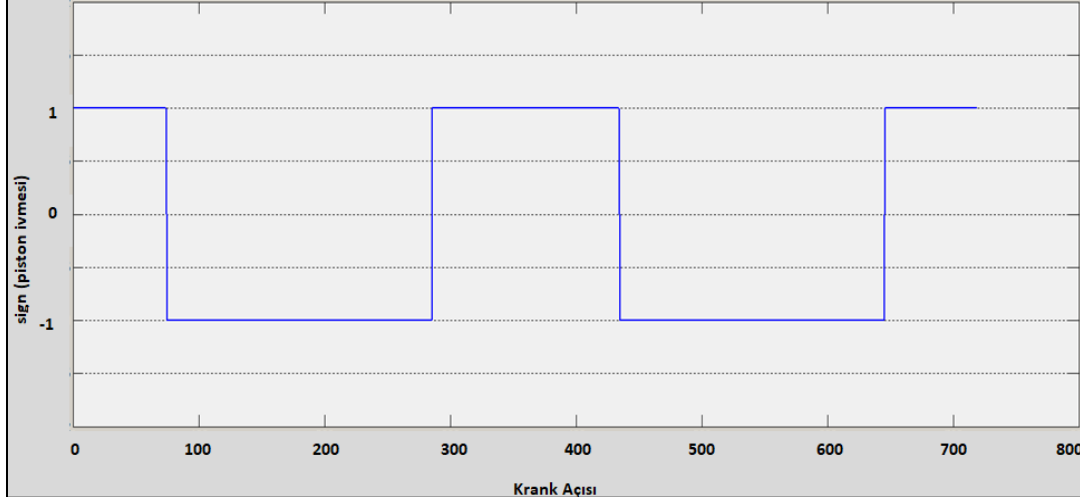
Denklemin 5'te yer alan, θ krank hızının sabit bir değerde olduğu varsayılırsa ve 5 no'lu denklemin işaret fonksiyonunun grafiği (sign(piston hızı) – krank açısı) çizilirse, hidrodinamik sürtünme kuvvetinin yönündeki değişim de incelenmiş olur.



Şekil 7. Sign (Piston Hızı) - Krank Açısı

Grafiğe göre, krank açısı $0^\circ - 180^\circ$ ve $360^\circ - 540^\circ$ aralıklarında iken hız vektörü pozitif, $180^\circ - 360^\circ$ ve $540^\circ - 720^\circ$ aralıklarında negatif yöndedir.

Piston üzerinde, yönü sürekli değişkenlik gösteren diğer bir kuvvet de atalet kuvvetidir. Atalet kuvveti piston ivmesine bağlı olduğundan, piston ivmesinin yönünün belirlenmesi atalet kuvvetinin de yönünün belirlenmesi anlamı taşımaktadır. Eğer krank ivmesi sabit bir değer kabul edilip, 7 no'lu denklemin işaret fonksiyonu çizilirse, atalet kuvvetinin yön değişimi de kolaylıkla görülebilir.



Şekil 8. Sign (Piston İvmesi) - Krank Açısı

Krank açısı $0^\circ - 75^\circ$, $285^\circ - 435^\circ$ ve $640^\circ - 720^\circ$ aralıklarında iken; ivme ifadeleri pozitif, diğer bölgelerde ise negatiftir.

Krank mili üzerine, muylulardan dört kuvvet etki etmektedir. Bu kuvvetlerin bileşkesi, krank ana yataklarına iletilmekte ve blok titreşimine neden olmaktadır.

$$\Sigma \vec{F}_{yatak} = F_{21}^{y1} + F_{21}^{y2} + F_{21}^{y3} + F_{21}^{y4} \quad (12)$$

Bloğu şasiye bağlayan iki adet motor takozu sebebiyle, blok iki adet paralel bağlı yay ve iki adet paralel bağlı sönümleyici etkisindeymiş gibi davranacaktır. Bu sebeple de iki adet yay kuvveti ve iki adet sönümleme kuvveti sistem üzerinde etkindir.

Yaylar için eşdeğer yay katsayısı $k_{eş}$ ve bloğun Y kadar hareket ettiği kabul edilirse oluşacak yay kuvveti;

$$\vec{F}_{yay} = k_{eş} \cdot Y \quad (13)$$

Paralel bağlı sönümleyiciler için eşdeğer sönümleme katsayısı $c_{eş}$ olursa sönüm kuvveti;

$$\vec{F}_{sönüm} = c_{eş} \cdot \dot{Y} \quad (14)$$

Motor bloğu düşey eksen doğrultusunda, herhangi bir \ddot{Y} ivmesi ile hareket ediyorsa, oluşan atalet kuvveti;

$$\vec{F}_{atalet} = m \cdot \ddot{Y} \quad (15)$$

Motor bloğunun üst kapağına etki eden gaz kuvveti ve krank ana yataklarına etki eden yatak kuvvetlerinin bileşkesi, sistemin düşey ekseninde titreşimine sebep olan $F(\theta)$ dış kuvvetini oluşturur. Krank açısı θ 'nın, zamana bağlı olduğu göz önüne alınırsa bileşke kuvvet $F\{\theta(t)\}$ olarak gösterilebilir. Bu bileşke kuvvet sebebiyle oluşan blok hareket denklemi;

$$m \cdot \ddot{Y} + c_{eş} \cdot \dot{Y} + k_{eş} \cdot Y = F(\theta(t)) \quad (16)$$

4. Sonuç ve Tartışma

Motorun temel parçaları olan piston, biyel ve krank milinin üzerinde oluşan kuvvetlerin yönlerinin kesin olarak belirlenmesinde en kritik eleman pistondur. Piston üzerinde oluşan kuvvetler ve yönleri belirlenebilirse, diğer parçaların ve motor bloğunun üzerindeki kuvvetler de belirlenmiş olacaktır. Bu sebeple öncelikle piston üzerinde, yönleri sürekli değişen hidrodinamik sürtünme kuvvetinin ve atalet kuvvetinin yönlerinin belirlenmesi gerekir. Bunun için piston hız ve ivme ifadelerinin, işaret fonksiyonu grafikleri incelenmiştir.

Hidrodinamik sürtünme kuvveti vektörünün, krank açısı 0° - 180° ve 360° - 540° aralıklarında iken pozitif, 180° - 360° ve 540° - 720° aralıklarında negatif yönde olduğu belirlenmiştir.

Piston üzerine etki eden atalet kuvvet vektörünün ise; krank açısı 0° - 75° , 285° - 435° ve 640° - 720° aralıklarında iken pozitif, diğer bölgelerde ise negatif yönde olduğu tespit edilmiştir.

Kuvvetler üzerindeki tüm işaret değişimleri göz önüne alındığında, kuvvet analizi için sistemin; 0° - 75° , 75° - 180° , 180° - 285° , 285° - 360° krank açısı aralıklarında incelenmesinin gerekli olacağı sonucu çıkarılmıştır. 360° ile 720° arası ise, ilk çevrimin simetrisi olduğundan yine aynı sonuçlar elde edilecektir. Tek fark, değişen stroklardan kaynaklı gaz kuvveti farklılığı olacaktır.

Piston hareketinin temel kuvvetleri olan gaz kuvvetleri, değişen stroklara göre termodinamik bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir. Piston üzerindeki kuvvetler belirlendikten sonra, diğer hareketli parçalar üzerindeki kuvvetler ve yönleri de tespit edilebilir. Hareketli parçalara etki eden kuvvetler Newton'un 3.yasası gereği bloğa da tesir edeceğinden, blok üzerine etki eden bütün kuvvetler belirlenebilir. Blok üzerinde etki eden kuvvetlerle D'alembert prensibine göre kuvvet eşitliği yazılırsa, motor bloğunun hareket denklemi de elde edilebilir.

Referanslar

Barelli, L., Bidini, G., Buratti, C., & Mariani, R. (2009). Diagnosis of internal combustion engine through vibration and acoustic pressure non-intrusive measurements. *Applied Thermal Engineering*, 29(8-9), 1707-1713.

Çetinkaya, S. (1999). *Motor Dinamiği*. Ankara - Türkiye: Nobel Yayın Dağıtım.

Erkaya, S., Su, Ş., & Uzmay, I. (2007). Dynamic analysis of a slider-crank mechanism with eccentric connector and planetary gears. *Mechanism and machine theory*, 42(4), 393-408.

Guzzomi, A. L., Hesterman, D. C., & Stone, B. J. (2007). The effect of piston friction on engine block dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 221(2), 277-289.

Karabulut, H., Öztürk, E., & Çınar, C. (2011). TEK SİLİNDİRLİ DÖRT ZAMANLI BİR DİZEL MOTORUNUN DİNAMİK MODELİ VE TİTREŞİMLERİNİN İNCELENMESİ. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(1), 173-183.

Manieniyar, V., & Sivaprakasam, S. (2013). Vibration Analysis in DI Diesel Engine Using Diesel and Biodiesel. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 1(4), 3586-3589.

Metallidis, P., & Natsiavas, S. (2003). Linear and nonlinear dynamics of reciprocating engines. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 38(5), 723-738.

Öztürk, E., & Karabulut, H. (2012). TEK SİLİNDİRLİ BİR DİZEL MOTORUNUN DİNAMİK VE TİTREŞİM ANALİZLERİ. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(3), 491-500.

Pasricha, M. S., & Hashim, F. M. (2006). Effect of the reciprocating mass of slider-crank mechanism on torsional vibrations of diesel engine systems. *Asean Journal on Science and Technology for Development*, 23(1&2), 71-81.

Pulkrabek, W. (2001). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. New York - ABD: John Wiley&Sons.

Söylemez, E. (2017). *Makine Teorisi-II Makina Dinamiği*. İstanbul - Türkiye: Birsen Yayınevi.

Uicker, J. J., Pennock, G. R., & Shigley, J. E. (2003). *Theory of Machines and Mechanisms*. New York-ABD: Oxford University Press.

Zweiri, Y. H., Whidborne, J. F., & Seneviratne, L. D. (2001). Detailed analytical model of a single-cylinder diesel engine in the crank angle domain. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 215(11), 1197-1216.



The Effects of TIG Welding Rod Compositions on Phase Distributions and Corrosion Properties of Dissimilar 304L and 420 Stainless Steel Welds

Mustafa Gökhan Murat¹ , Aziz Barış Başıyigit ^{*2} 

¹Naval Training and Education Command, Turkish Naval Forces, 34676, İstanbul, TURKEY

² Department of Metallurgical and Material Engineering, Faculty of Engineering, 71450 Kırıkkale, TURKEY

Başyuru / Received: 07/09/2019

Kabul / Accepted: 09/10/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 04/11/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Abstract

304L austenitic and 420 martensitic stainless steels are demanded in wide range of industries. 304L alloy exhibits good resistance to oxidizing medias up to 760°C and they also maintain superior impact properties at cryogenic temperatures while 420 alloy provides the strength values close to tool steels in with satisfactory corrosion properties in ambient atmospheres.

In this work; 420 plate is TIG (Tungsten Inert Gas) welded with 304L plate with both thicknesses of 3 mm. Welding operation is applied by two passes under pure argon gas also with shielding the weld root. 3 types of TIG welding rods; ER312, ER316L and ER2209 are used in TIG welding for ensuring 3 different weld metal compositions. The effects of TIG welding rod type on weld metal phase ratios with microstructural and corrosion properties are investigated. Microstructural inspections and corrosion (weight loss) tests are applied to all joints after welding operations.

The sample joined by ER312 TIG rod transformed the weld metal into dendritic microstructure and the sample joined by ER2209 TIG rod resulted in globular type of weld metal microstructure. The specimen that welded by ER316L type TIG welding rod resulted in the best corrosion test values among all welded samples.

Keywords

“420 and 304L stainless steels, TIG welding, phase analysis, corrosion of stainless steels”

1. Introduction

Martensitic stainless steels are demanded in industries where high strength values are desired close to transformation hardenable steels with satisfactory corrosion resistance properties under ambient atmospheres. Common applications include; steam, gas and jet engine turbine blades at low temperatures, pipes, hydro-turbines, freshwater implements and petroleum industries (Lippold & Kotecki, 2005).

Austenitic stainless steels are preferred particularly for their high impact properties at cryogenic and high temperatures and they exhibit superior corrosion resistance to oxidation in wide range of applications except sea water. Extensive usage fields include especially house wares, medical products, heat treating baskets and furnace inner parts (Lippold & Kotecki, 2005; ASM Vol. 2, 2005).

In this work; joining of dissimilar 420 and 304L stainless steels are studied by TIG fusion welding method with three different TIG welding rods. Joining of these two types of stainless steels by fusion welding methods requires precautions related with weld metal properties (Lippold & Kotecki, 2005; ASM Vol. 2, 2005; Kou 2002; ASM Vol. 4, 1991; ASM Vol.6, 1993). Welders have to be aware about problems related with loss of corrosion properties due to the weld metal compositions. Researchers studied about welding of 304L and 420 separately with other types of steels but dissimilar joining of 304L alloy to 420 alloy by TIG fusion welding method is not reported (Dey et al. 2009; Soltani et al., 2018; Khan et al., 2012; Kumar et al., 2017). The welded samples metallographic studies are applied as indicated in literature (Lippold & Kotecki, 2005; ASM Vol. 4. 1991; ASM Vol. 6 1993; George et al., 2004). As proposed by researchers, brittle chromium rich precipitates may form and worsen the corrosion properties of these high alloyed steels in welding operations (Lippold & Kotecki, 2005; ASM Vol. 6. 1993; Jiang et al., 2006; Singh & Shahi 2018; ASM Vol. 13-A 2003; Pierre & Roberge, 2000]. Hence, corrosion test is applied on all welded specimens Corrosion test is based on weight loss difference principle by keeping samples in solution as indicated in ASTM G48, ASTM G1 and ASTM G31 standards (ASTM G48, 2015; ASTM G1, 2017; ASTM G31, 2012). Microstructural image analysis is applied for estimating the phase distributions along the weld centerline and also on unwelded base metals according to ASTM E562, ASTM E1245 standards respectively (ASTM E562, 2011; ASTM E1245). Magnetic phase analysis is studied according to ISO 8249 and ISO 17655 standards for ensuring and comparison of the microstructural image analysis test results (EN ISO 8249, 2000; EN ISO 17655, 2003). Anton Schaefflers phase prediction diagram is also used for comparison of phase analyzing methods among each other [Lippold & Kotecki, 2005; ASM Vol. 6, 1993).

2. Experimental

AISI/SAE 420 martensitic (UNS S42000) and AISI/SAE304L (UNS S30403) austenitic stainless steels are prepared for joining by TIG welding.

The chemical composition of both base metals from spectral analysis by AMETEK Spectromax Optical Argon Emission Spectrometer are given in Table 1. ER312, ER316L and ER 2209 coded TIG welding rod chemical compositions from the TIG Rod manufacturers' datas verified within the limits according to standards (AWS A5.9, 2017; EN ISO 14343, 2017) as listed in Table 1.

Table 1. Spectral analysis of 304L, 420 stainless steel plates and manufacturers compositions of TIG welding rods

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	N	Fe	Cu	Others
304L	0.027	0.381	1.19	0.021	0.003	18.22	0.054	8.01	0.202	0.069	71.6	--	0.322
420	0.231	0.504	0.629	0.013	0.002	13.34	0.0067	0.138	0.042	0.022	84.9	--	0.172
ER312	<0.15	0.4	1.6	0.030	0.030	30.7	0.20	8.8	--	--	Bl.	0.14	--
ER316L	<0.01	0.4	1.7	0.030	0.030	18.2	2.6	12	--	0.04	Bl.	0.10	--
ER2209	<0.01	0.5	1.5	0.030	0.030	22.7	3.2	8.5	--	0.17	Bl.	0.01	--

The dimensions of specimen couples and welded samples are shown in Figure 1.

420 martensitic stainless steel plates are heat treated at 300 °C for 45 minutes of time period one by one just before each welding operation separately. 304L stainless steel plates were not pre-heated as austenitic groups are not transformation hardenable.

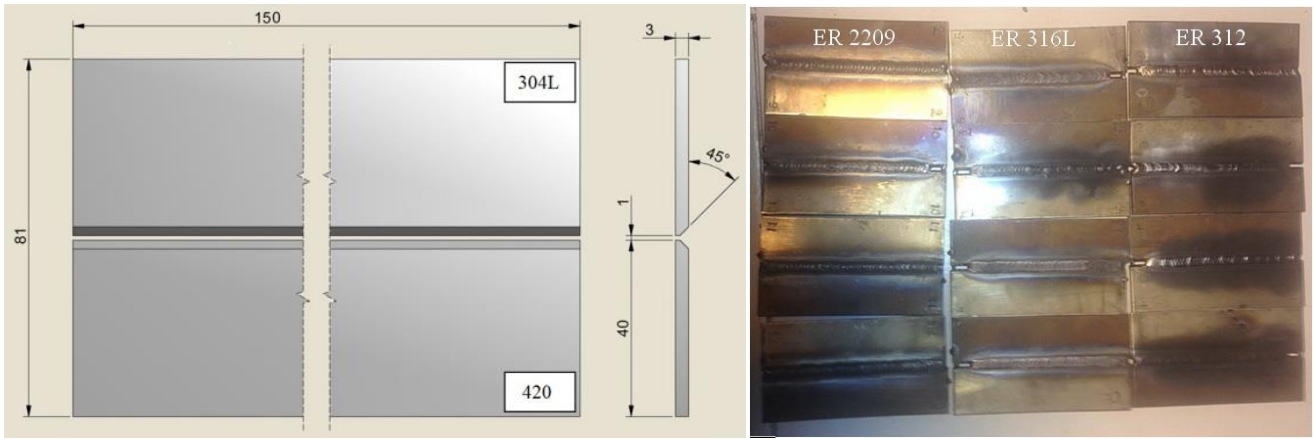


Figure 1. The dimensions of welded samples

TIG welding is maintained by ESAB TIG 4300i/AC/DC machine. TIG welding parameters are listed in Table 2.

Table 2. TIG welding parameters

TIG Rod 2.0 Ø mm	Welding Current DC- (Amperes)		Welding Voltage (Volt)		%100 Argon Shielding Gas Flow (l/min)			Welding Speed (mm/sec.)
	Root Pass	2 ^{nd.} Pass	Root Pass	2 ^{nd.} Pass	Root Pass	2 ^{nd.} Pass	Root Pass	2 ^{nd.} Pass
ER 312	70	93	9	11	10	6	2.33	2.16
ER 316L								
ER 2209								

Pure Argon is used as shielding gas in welding operations. The specimen couples are also shielded by argon gas from their root sides. TIG welding operation is applied in two passes. The net heat input is estimated for both of the weld passes by using (H_{net}) equation (Kou, 2002; ASM Vol. 6. 1993).

$$H_{net} = (\eta \times E \times I) / V \quad (1)$$

The symbols; ‘ η ’ indicates welding efficiency, E; welding voltage (volts), I; welding current (Amperes), V; welding speed (mm/seconds). ‘ η ’ value is 70% (0.7) in TIG welding application for DC(-) current type (Kou, 2002). H_{net} values are estimated for both root and 2nd (final) passes separately.

$$H_{net-root-pass} = (0.7 \times 9V \times 70A) / (2.33mm/sec) = 189 \text{ joule/mm}$$

$$H_{net-2^{nd}(final)pass} = (0.7 \times 11V \times 93A) / (2.15mm/sec) = 333 \text{ joule/mm}$$

After welding operation all welded samples are heat treated for stress relieving at 360 °C for 45 minutes in a dry resistance furnace. After post-weld heat treatment, welded samples are machined for microstructural inspections and corrosion tests in a way according to ISO 15614-1 standard (ISO 15614-1, 2017).

Microstructural investigations are applied on samples after electrolytically etching in 20% NaOH solution under 1.6 amperes of current. Micrographs are taken by Leica Brand DM 4000M model optical microscope under 100 μ m scale of magnification. Phase distributions of weld metals on each samples are investigated by Schaeffler diagram, Image (microstructural) Analysis and Magnetic Phase testing methods. Anton Schaeffler-1949 diagram basically focuses on equations estimating chromium and nickel equivalents (*Cr. eq. Ni. eq.*) by weights in percentage. Schaefflers chromium and nickel equivalents by weight for base and weld metals and 3 different TIG rods in percentages are estimated according to Equations 2 and 3 below (Lippold & Kotecki, 2005; ASM Vol. 6, 1993).

Schaefflers' Chromium Equivalent;

$$Cr. eq. = Cr\% + Mo + \%1.5 \times Si + 0.5 \times Nb \quad (2)$$

Schaefflers' Nickel Equivalent;

$$Ni_{eq} = Ni\% + 30 \times C\% + 0.5 \times Mn \quad (3)$$

The results of Chromium and Nickel Equivalents for base metals, weld metals and TIG rods are substituted onto the Schaefflers diagram for predicting the phases. Image analysis is applied on electrolytically etched base metals and welded samples weld metal zones by Carl Zeiss Jena Brand optical microscope under 100x magnified microstructures. The 'Kameram' licensed software is used for image analysis estimations in laboratory according to ASTM E1245 and ASTM E562 standards.

Magnetic phase detection test is also applied on all samples. 420 and 304L base metals and also 3 different weld metals phase distributions are also determined by magnetic phase analyzing technique. The method principally depends on detecting ferromagnetic phases e.g. delta-ferrite, martensite by a probe. All magnetic phases in the other non-magnetic structure are measured. In addition to delta ferrite, martensite and other ferromagnetic phases are also taken into total account. Nevertheless, carbides like chromium carbides contribute the pinning magnetic domain wall movements of structures so that their presence in structure results in poor magnetic properties (Douglas & Dietrich, 1997).

The magnetic estimations of phases are applied according to AWS A4.2, EN ISO 17655 and EN ISO 8249 standards. Magnetic phase analyzer device Ferritetester SP 10-a has a probe diameter of 10 mm. The accuracy of Ferritetester SP-10-a is $\pm 2\%$ up to 30% and $\pm 3\%$ up to 80% by volume of magnetic phases. The uncertainty value of device is approximately $\pm 0.4\%$.

Magnetic phase analyzing instrument, apparatus and measurement schedule are shown in Figure 2.

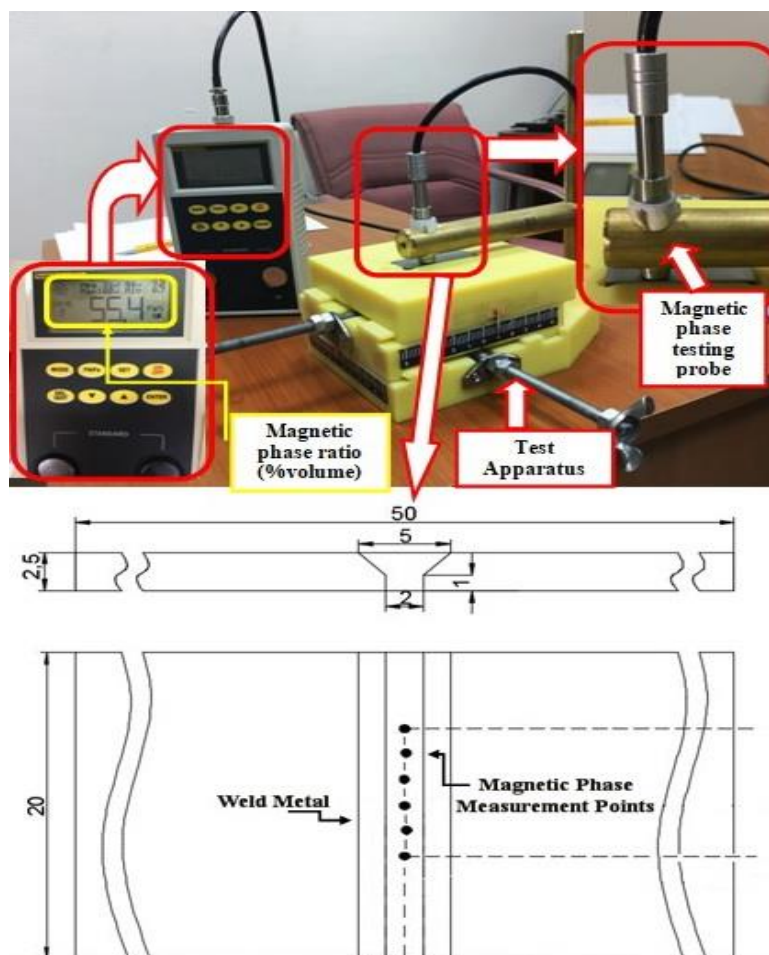


Figure 2. Magnetic phase inspection on welded samples

Corrosion (weight loss) tests are applied on all welded samples according to ASTM G31, ASTM G48 and ASTM G1 standards. Three separate corrosion test samples per each welding condition (per TIG rod type) are used in corrosion tests.

Samples in dimensions of 2.5x20x50 mm are grinded uniformly for corrosion tests. Length, width and thickness dimensions of samples are measured by a caliper. The thickness values of samples are measured from 3 different points throughout the full length for ensuring more precise values.

The corrosion test is based on weight loss principle by exposure of welded samples to test solution as they react with the solution. Therefore all of the samples are weighed by a 0.0001g precision scale before and after the tests. For ensuring the results, every corrosion test sample is weighted by 3 separate times at 22 °C within the same laboratory testing conditions. Weights of all corrosion test samples before the test are calculated for each sample. Corrosion test liquid is prepared from $FeCl_3 \cdot 6H_2O + H_2O$ solution (100 g reagent grade ferric chloride in 900 mL reagent water) with adjusting the PH values approximately to 1.3. The

samples are immersed in solution during 72 hours of time at 22 °C and then immediately cleaned from oxidation residuals with brushing and rinsed by pure water and finally with alcohol. Lastly samples are dried by hairdryer.

3. Results and Discussion

3.1. Microstructural Investigations

Micrographs of base metals

304L and 420 base metals micrographs are investigated. Microstructure of 420 martensitic stainless steel base metal is given in Figure 3-(a). The darkest (black points or areas) phase is chromium rich carbides, dark phases are martensite and white (bright) phase is delta-ferrite in raw unwelded 420 stainless steel base metal. Microstructure of 304L austenitic stainless steel base metal is showed in Figure 3-(b). White (brighter) phase is austenite and darker phase (like dots) is grain boundary (δ) delta-ferrite in raw unwelded 304L stainless steel base metal. Delta ferrite has the same micro structural properties and crystallographic structure like ferrite but it has been assigned as high temperature ferrite in steels (Lippold & Kotecki, 2005; George F. et al, 2004).

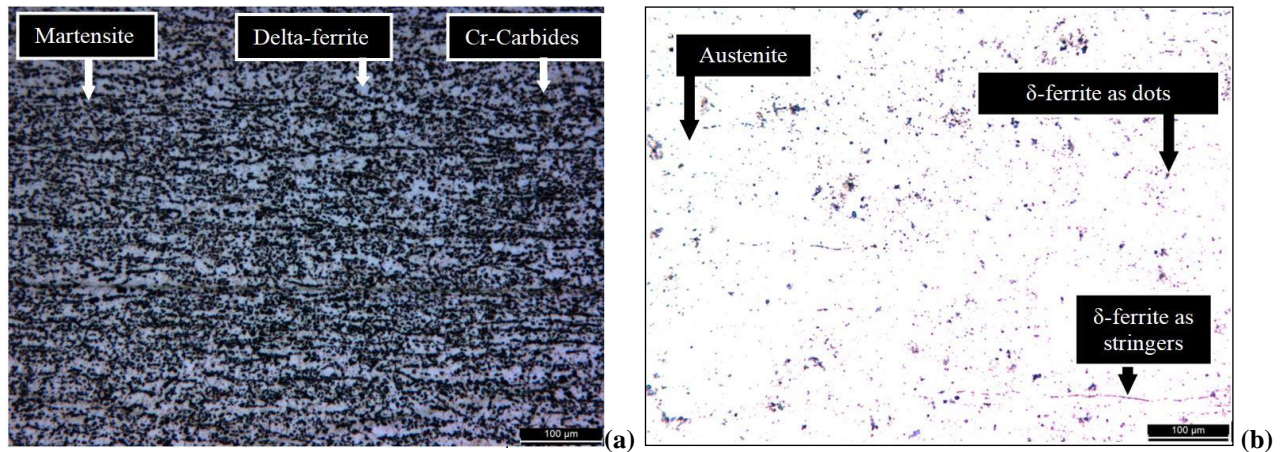


Figure 3. Microstructures of (a) 420 and (b) 304L base metals.

Micrographs of welded samples

Weld metals of each welding condition were investigated in joints.

Micrographs of samples welded by ER312 TIG rod

Microstructures of samples welded by ER312 TIG rod are given in Figure 4. Bright phase is delta-ferrite and the dendritic phase is austenite.

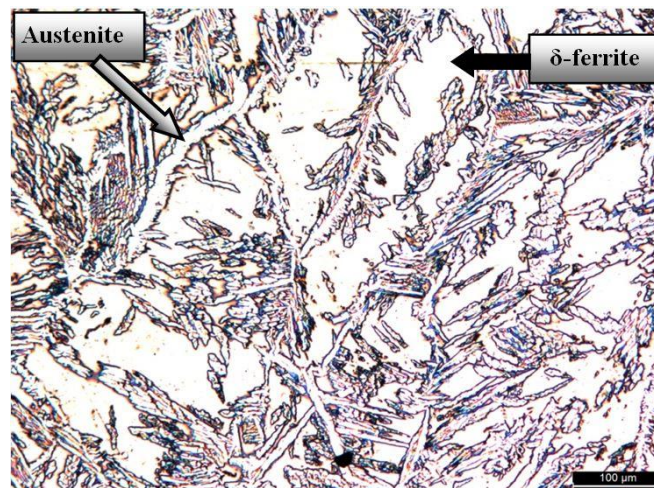


Figure 4. Weld metal microstructure of sample joined by ER312 TIG Rod

Micrographs of samples welded by ER316L TIG rod

Microstructures of samples welded by ER316L TIG rod are given in Figure 5. The dark fields are grain boundary delta ferrite phase and brighter (white) fields indicates the austenite phase.

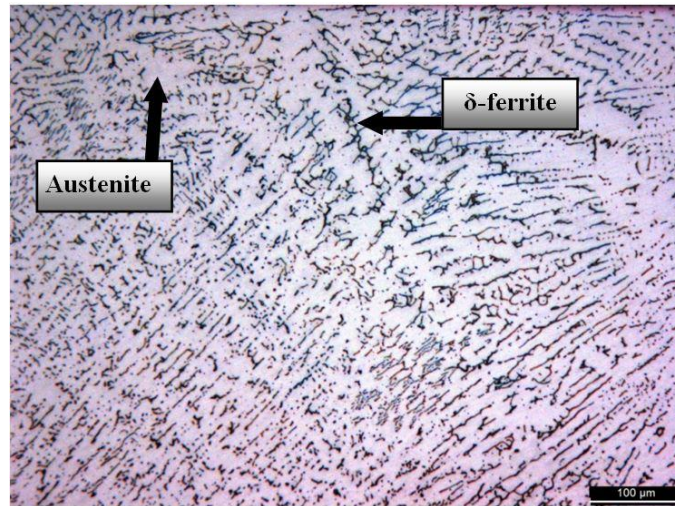


Figure 5. Weld metal microstructure of sample joined by ER316L TIG Rod

In consequence of using ER316L TIG welding rod, the dominant austenite phase with a minority of delta-ferrite is observed.

Micrographs of samples welded by ER2209 TIG rod

Microstructures of samples welded by ER2209 TIG rod are given in Figure 6. In Figure 6, as compared to the Figure 5, there has been no major differences noted. Hence, especially in Figure 6, the weld metals delta ferrite seemed like more globular structure besides to Figure 5.

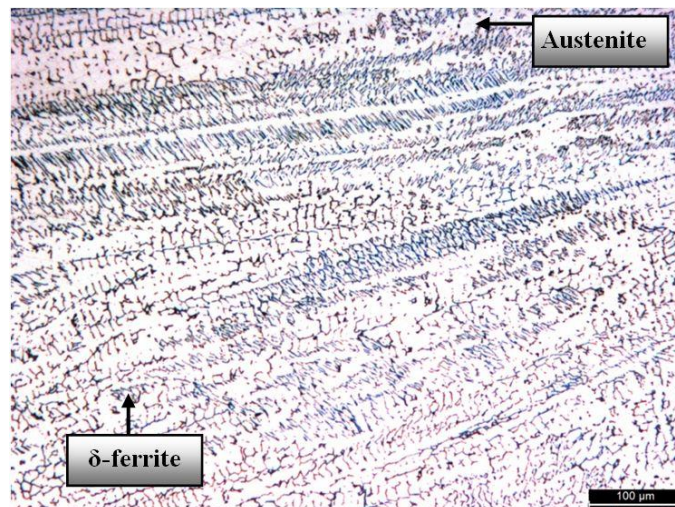


Figure 6. Weld metal microstructure of sample joined by ER2209 TIG Rod

3.2. Phase Analysis

Phase Estimation by Schaeffler Diagram

The equivalent values for 304L and 420 base metals are estimated according to Schaefflers Equations.

$$Cr_{Eq,304L} = 18.22 + 0.0545 + 1.5 \times 0.383 + 0.5 \times 0 = 18.9$$

$$Ni_{Eq,304L} = 8.01 + 30 \times 0.0276 + 0.5 \times 1.19 = 9.4$$

$$Cr_{Eq,420} = 13.35 + 0.0067 + 1.5 \times 0.235 + 0.5 \times 0 = 14.1$$

$$Ni_{Eq,420} = 0.142 + 30 \times 0.234 + 0.5 \times 0.629 = 7.6$$

The equivalent values for ER312 TIG Welding Rod;

$$Cr_{Eq,ER312} = 0.7 + 0.2 + 1.5 \times 0.4 + 0.5 \times 0 = 31.5$$

$$Ni_{Eq,ER312} = 8.8 + 30 \times 0.15 + 0.5 \times 1.6 = 9.9$$

The equivalent values for ER316L TIG Welding Rod;

$$Cr_{Eq,ER316L} = 18.2+2.6+1.5 \times 0.4+0.5 \times 0=21.4$$

$$Ni_{Eq,ER316L} = 12+30 \times 0.01+0.5 \times 1.7=13.2$$

The equivalent values for ER2209 TIG Welding Rod;

$$Cr_{Eq,ER2209} = 22.7+2.6+1.5 \times 0.4+0.5 \times 0=26.7$$

$$Ni_{Eq,ER2209} = 8.5+30 \times 0.01+0.5 \times 1.5=9.6$$

According to Schaefflers diagram, 420 and 304L stainless steels have dominant martensitic and austenitic microstructures respectively as given in Figures 3-(a) and (b). ER312 TIG welding rod includes approximately 85% delta-ferrite and remaining austenite by volume according to superimposed Schaeffler diagram given in Figure 7.

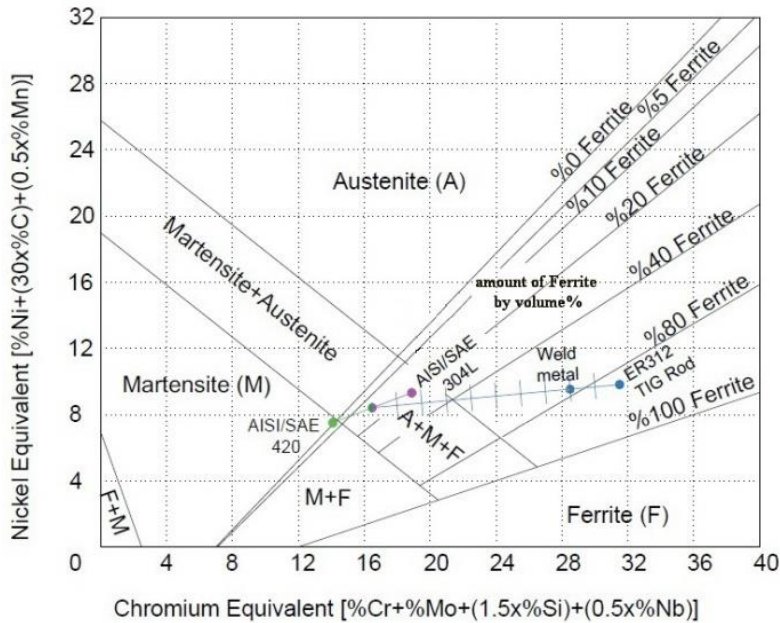


Figure 7. Phase locations of samples joined by ER312 TIG Rod plotted on Schaeffler Diagram

Weld metal of sample joined by ER312 TIG rod contains approximately 78% delta-ferrite and remaining austenite in Figure 7. ER316L TIG welding rod and weld metal of sample joined by ER316L TIG rod both includes approximately 10% delta-ferrite and remaining austenite as seen in Figure 8.

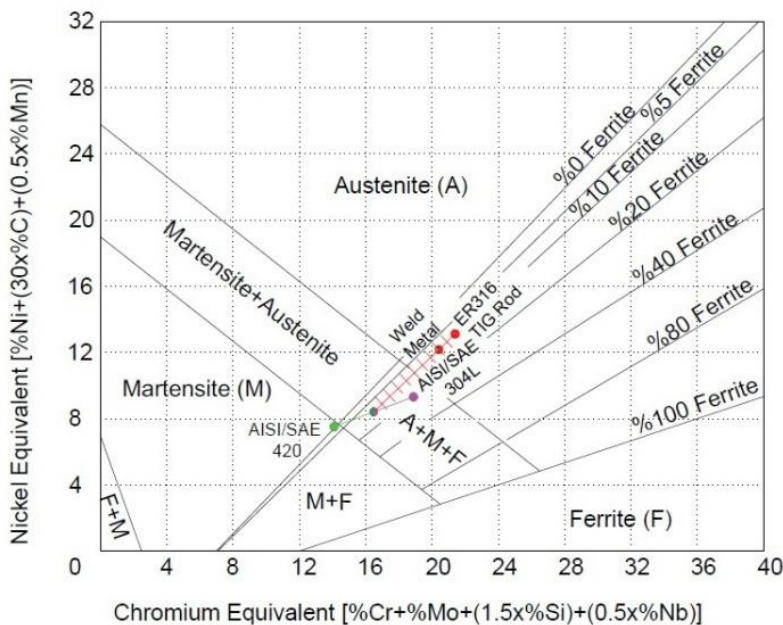


Figure 8. Phase locations of sample joined by ER316L TIG Rod plotted on Schaeffler Diagram

ER2209 TIG welding rod includes approximately 66% delta-ferrite and remaining austenite by volume according to Figure 9. Weld metal of sample joined by ER2209 TIG rod contains approximately 56% delta-ferrite and remaining austenite in Figure 9.

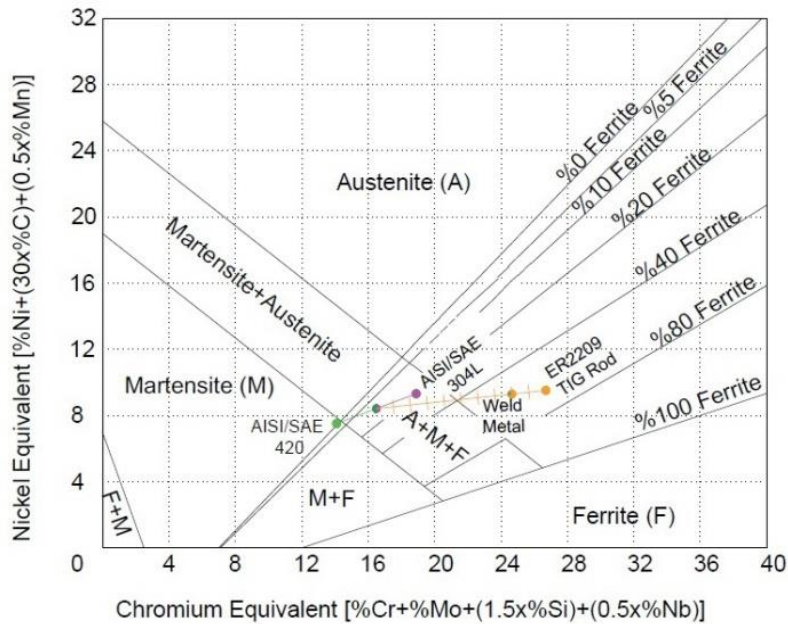


Figure 9. Phase locations of sample joined by ER2209 TIG Rod plotted on Schaeffler Diagram

Phase Estimation by Image Analysis

Image (phase) analysis was performed by ‘Kameram’ Software with metallographic examinations on electrolytically etched samples under 100µm magnification scaled micrographs.

Image Analysis of Base Metals

Image analysis result screen of 304L and 420 unwelded base metal is given in Figure 10. 304L base metal includes approximately 99% austenite (as yellow) and remaining minor amounts of delta-ferrite (as red) given in Figure 10-a.

420 base metal contains approximately 43% martensite (as blue), 31% delta-ferrite (as red), 17% carbides (as green) and 9% retained austenite (as yellow) given in Figure 10-b.

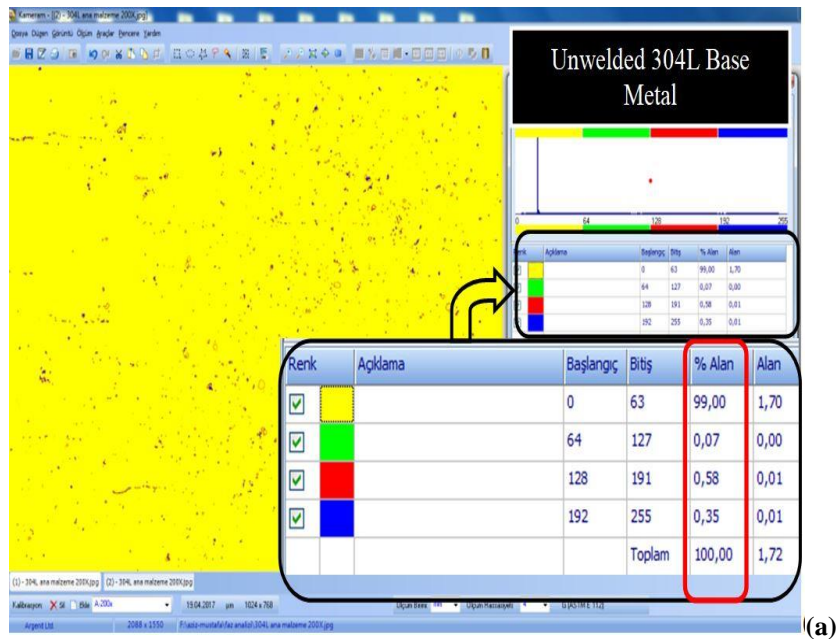


Figure 10. Image analysis of (a) 304L and (b) 420 base metal (continued)

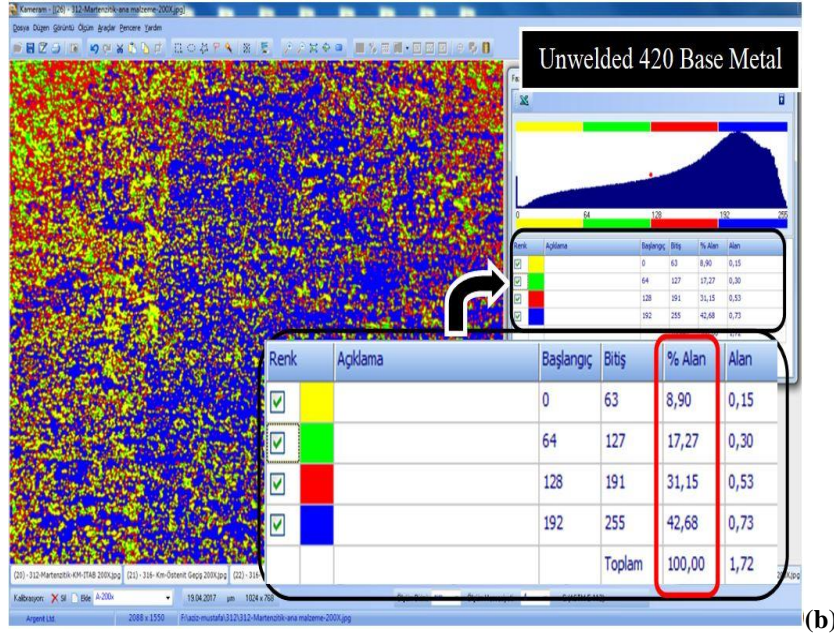


Figure 10. Image analysis of (a) 304L and (b) 420 base metal

Image Analysis of Weld Metals

The samples joined by 3 different TIG rods weld metal phase distribution is also analyzed by image analysis technique. Image analysis computational result screen views of weld metals are given in Figure 11.

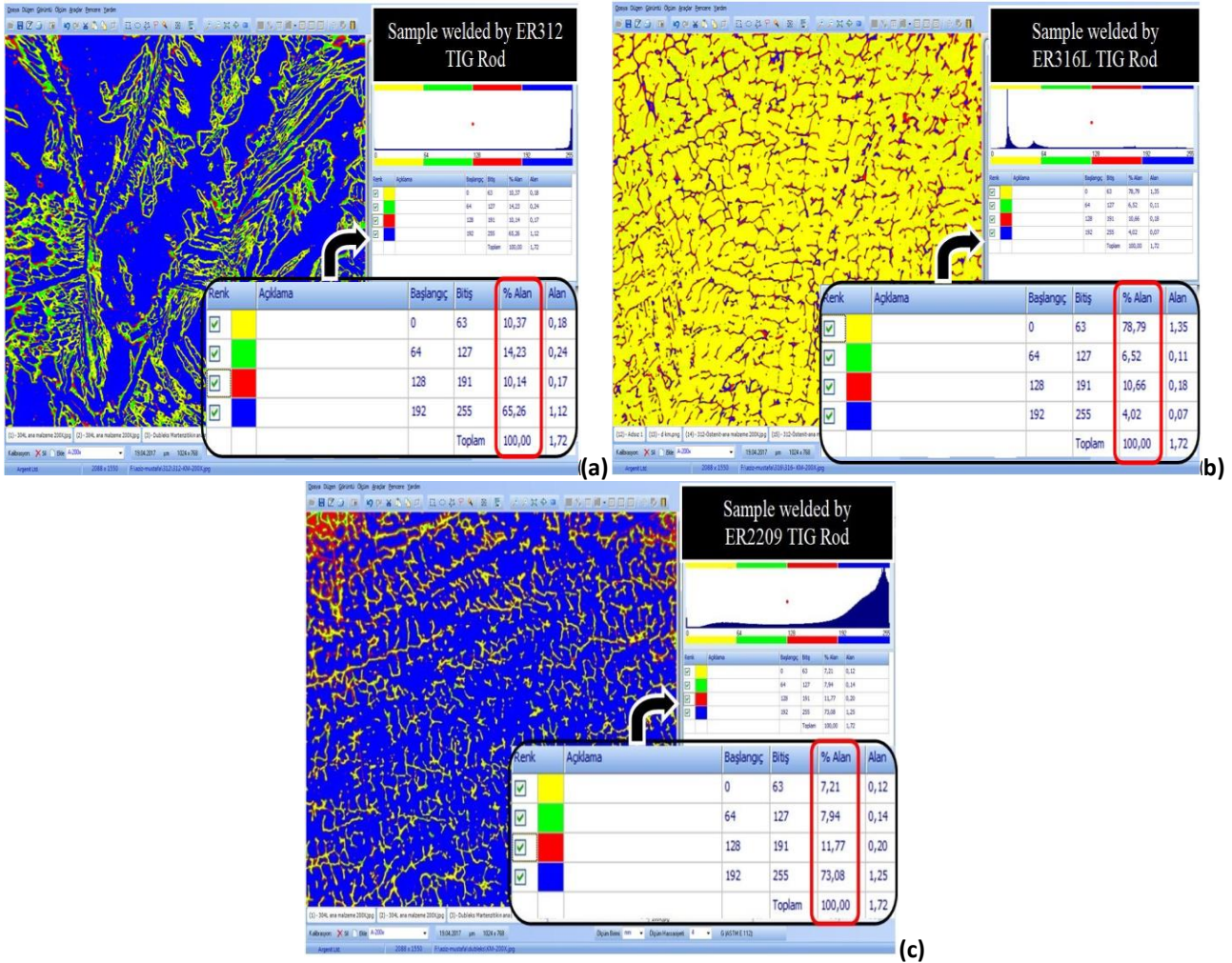


Figure 11. Image analysis of samples weld metals joined by (a) ER312, (b) ER316L and (c) ER2209 TIG rods.

Weld metal of sample joined by ER312 TIG rod contains approximately 65% delta-ferrite (as blue) and remaining amounts of austenite given in Figure 11-a.

The software distinguishes the remaining phases but the remaining phase (in three different color scale) is only austenite in weld metal as detailed in microstructure of Figure 4. Weld metal of sample joined by ER316L TIG rod contains approximately 79% austenite (as yellow) and remaining amounts of delta-ferrite seen in Figure 11-b.

The software distinguishes the remaining minor amounts of phases but the remaining phase (in three different color scale) is only delta-ferrite in weld metal as detailed in microstructure of Figure 5.

Weld metal of sample joined by ER2209 TIG rod contains approximately 73% delta-ferrite (as blue) and remaining amounts of austenite given in Figure 11-c. The software distinguishes the remaining minor amounts of phases but the remaining phase (in three different color scale) is only delta-ferrite in weld metal as detailed in microstructure of Figure 6. The approximate weld metal phase content of samples joined by ER312, ER316L and ER2209 TIG rod estimated by microstructural image analysis are listed in Table 3.

Table 3. The approximate weld metal phase content of samples joined by ER312, ER316L and ER2209 TIG rod estimated by microstructural image analysis

Phase	TIG Rod Type		
	ER312	ER316L	ER2209
Delta- ferrite	65.26	21.21	73.08
Austenite	34.74	78.79	26.92

Phase distributions tested by Magnetic methods

Magnetic Phase analysis is applied on base metals and joined samples weld centerlines. 6 individual points at weld centerline is tested according to ISO 8249 and ISO 17655 standards. Magnetic phase testing detects mainly the ferromagnetic phases as martensite and delta-ferrite. Paramagnetic austenite phase is not detected in magnetic phase analyzing techniques. 304L austenitic stainless steel raw material (base metal) has exhibited 98% by volume of austenitic non-magnetic structure so that the remainder phase is magnetic delta-ferrite. Magnetic phase analysis of 420 martensitic stainless steel raw materials (base metal) was resulted in approximately 100% by volume that includes both major magnetic phases as delta-ferrite and martensite. The structure is whole magnetic. The welded samples magnetic phase detection results are given in Table 4.

Table 4. The approximate weld metal phase content of samples joined by ER312, ER316L and ER2209 TIG rod estimated by magnetic phase testing

TIG Rod Type	ER312	ER316L	ER2209
Vol. % of magnetic phases (delta-ferrite+martensite). 6 individual test points on weld centerline according to ISO 8249 and ISO 17655	61 60 58 60 60 63	10 11 13 11 11 12	45 46 43 47 37 38
Standard deviation	1.633	1.033	4.23
Arithmetical average	60	11	43

Weld metal of samples joined by ER312, ER316L and ER2209 TIG rod has approximately 60%, 11% and 43% magnetic phases of martensite and delta-ferrite by volume respectively as given in Table 4.

3.3. Corrosion Tests

Samples are immersed and reacted with corrosion test solution during 72 hours of time. Front and back sides of test samples before and after corrosion test are shown in Figure 12.

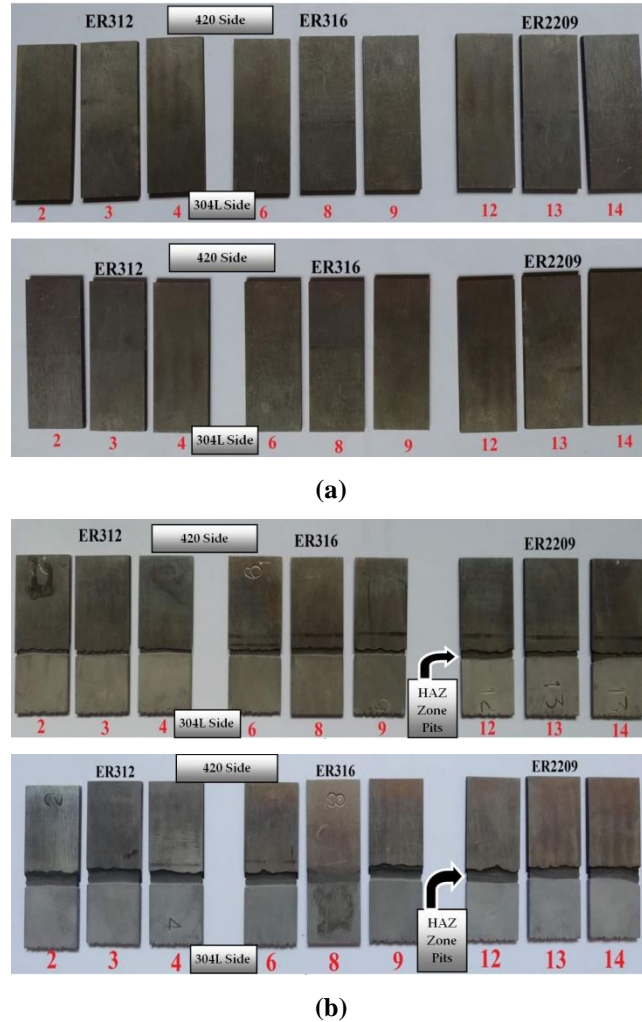


Figure 12. Front and rear side views of corrosion test specimens (a) before (b) after the test

Pits of corrosion like straight lines can be seen in Figures 12-b. The corrosion effect is detected especially on 420 stainless steel side of welded samples. 304L side exhibited a little corrosion view as compared to 420 side of all welded samples. Carbon content is the major factor in a stainless steel alloy to form detrimental corrosion products such as chromium carbides in a welded construction. The carbon content of 420 stainless steel plates is much higher than 304L plates so that existing chromium element formed carbides with carbon element just after welding operation finishes on cooling. For estimating the corrosion rate, the total surface area of specimens is calculated by equation 4 (ASTM G48, 2015).

$$\text{Total Surface Area} = 2 \times [(thickness) \times (length) + (thickness) \times (width) + (height) \times (width)] \quad (4)$$

As soon as the samples are completely cleaned and dried they are weighed again for three individual times by a 0.0001g precision scale. Corrosion rate is defined in ASTM G48 as weight loss after the test and is estimated by equation 5.

$$\text{Corrosion Rate} = \text{Total Weight Loss} / \text{Total Surface area of sample} \quad (5)$$

The result obtained from this equation must be smaller than 0.0001g/cm² limit value in order not to be identified as sensitive to corrosion solution. Whether the result is bigger than limit value there should be sensitivity to test solution depending also at temperature that samples are exposed. ASTM G48 provides information whether material exhibits corrosion or not in such test solution.

Corrosion test results are given in Table 5. According to weight loss differences in Table 5, all of the welded specimens are affected from corrosion test solution so that it means all samples are sensitive to test solution at ambient laboratory temperatures of 22°C. The arithmetical average values of corrosion test results are also given in Table 5 for simple comparison. For comparing the samples corrosion resistance values between themselves in units of corrosion rates (mm/year) ASTM G1 standard is also used.

Corrosion rate in ASTM G1 is estimated by equation 6 below.

$$\text{Corrosion Rate} = (K \times W) / (A \times T \times D) \quad (6)$$

Corrosion Rate: (mm/year) ,K: constant: 8.76x10⁴ (mm/year), W: weight loss (gram), A: surface area (cm²), T: time (hours), D: density (gram/cm³).

Table 5. Corrosion test results of specimens

Sample No.	The Samples joined by:	Total Surface area (mm ²)	Weight loss (gram)	Arithmetical average	Standard Deviation	ASTM G48 <0,0001	Arithmetical average	Standard Deviation	ASTM G1 (mm/year)	Arithmetical average	Standard deviation
2	ER312 TIG Rods	2346.6281	1.8826	1.9262	0.006	2.6742	2.7208	0.062	0.0802	0.0816	0.002
3		2353.6000	1.9040			2.6966			0.0809		
4		2378.5998	1.9920			2.7916			0.0837		
6	ER316L TIG Rods	2370.5163	2.3860	1.8079	1.091	3.3552	2.5403	1.533	0.1007	0,0762	0.046
8		2375.4446	0.5496			0.7713			0.0231		
9		2373.3414	2.4880			3.4944			0.1048		
12	ER2209 TIG Rods	2354.3833	1.8651	1.8784	0.093	2.6407	2.6435	0.132	0.0792	0.0793	0.004
13		2377.6645	1.7924			2.5128			0.0754		
14		2373.9231	1.9778			2.7771			0.0833		

The sample joined with ER316L TIG rod exhibited the highest corrosion resistance values in ASTM G1 corrosion test. ER316L TIG rod has the lowest amounts of chromium among the other two TIG rods. Therefore, chromium element formed less amounts of carbides with 420 alloys carbon quantities. Besides, chromium tends to precipitate into delta-ferrite and martensite phases in order to form chromium rich carbides (Lippold & Kotecki, 2005). The samples joined by ER316L TIG rod include the lowest amounts of delta-ferrite and martensite phases therefore they exhibited the better corrosion behavior among the other samples. The samples joined with ER312 TIG welding rods exhibited dendritic austenitic structure in weld metal as it includes no nitrogen, so that nitrogen makes the austenitic structure become more globular instead of a needle-like structure in the weld metal.

ER312 TIG rod has higher carbon and chromium amounts among other two TIG rod types. After welding operation with equal cooling effects weld metal gained the highest ratios of martensite and carbides as compared with other welded samples. The weld metal of sample welded by ER316L TIG rod has resulted in the highest amounts of austenite by the reason of having the highest amounts of austenite promoting elements as nitrogen, nickel, manganese and copper among the other TIG rods. The weld metal of sample welded by ER2209 TIG rod has exhibited the maximum amount of delta-ferrite owing to have the highest amounts of ferrite promoting elements such as chromium, molybdenum, silicon among the other TIG rods. Magnetic phase analysis results involve all magnetic phases as martensite and delta-ferrite together. Hence, micro-structural image analysis results differ from magnetic testing values. However, the results clarify the tendency of phase distribution ratios between each other.

The samples joined with ER316L and ER2209 TIG welding rods have exhibited globular austenitic microstructure in weld metal zones in consequence of including nitrogen in these TIG rods. According to ASTM G48 standard, all of the samples are affected from corrosion test solution at ambient laboratory temperature.

The estimated corrosion test results obtained from ASTM G48 must be smaller than 0.0001g/cm² limit value in order not to be identified as sensitive to corrosion solution but in fact all corrosion test samples results are higher than this limit value. These is no chance to make comparison among these corrosion test results by ASTM G48 as these results only reveals whether the structure is sensitive to corrosion medium or not. Corrosion test results are also estimated by ASTM G1 standard for comparing all of the results among each other. The samples welded by ER316L TIG rod displayed the highest corrosion resistance among all of the three TIG rods as a result of having the lowest amounts of delta-ferrite, martensite and carbides so that these phases consumes the chromium amounts in case of forming detrimental compounds.

4. Conclusions

1. All of the welded samples are effected with test solution in corrosion tests.
2. The majority of corrosion effects are detected on 420 base metal sides within all samples. Little corrosion traces occurred on 304L base metals.
3. ER316L TIG welding rod can be selected in welding of dissimilar 420 and 304L stainless alloys for qualified joining related with better corrosion resistance among the ER312 and ER 2209 TIG rods used in experimental studies in this work.
4. ER2209 TIG welding rod can also be selected where globular grain structure is preferred as a result of the TIG rod including the maximum amounts of nitrogen for ensuring globular microstructure of weld metal with satisfactory corrosion properties according to test results.

5. The carbon content of 420 martensitic stainless steel is higher than 304L alloy so that the higher corrosion effects are observed on 420 alloy sides of all welded samples. The higher carbon amount results in higher corrosion products by forming detrimental compounds such as chromium carbides in ferric chloride bearing solutions.
6. Phase distributions of weld metals are analysed by three common methods but the results of image analysis was unlike with magnetic phase testing and Schaefflers diagram. The resolution accuracy of Kameran Image Analysis software is not adequate to determine the minor amounts of phases. Magnetic phase analysing method covers all magnetic phases together like martensite and delta ferrite e.t.c. but Schaefflers diagram and image analysis techniques determines all phases seperately. However, the results of three different phase analyzing methods are consistent within each other.
7. Increasing chromium amounts in TIG welding rods increased the delta-ferritic structure while nitrogen supported TIG rods promoted austenitic microstructure in weld metals of samples.

5. Acknowledgements

The authors express their thanks to Gazi University and Kırıkkale University, Metallurgical and Materials Engineering Departments Laboratories for their precious supports about testing instruments.

References

- ASM Int. Handbook Committee, (2005). 'Properties and Selection: Wrought Stainless Steels' ASM Handbook Vol. 2, pp.1303.
- ASM Metals Handbook Vol. 4, (1991). Heat treating, ASM International.
- ASM Metals Handbook. Vol. 6, (1993). Welding Brazing and Soldering; ASM International. Almere, The Netherlands.
- ASTM G1, (2017). Standard test methods for preparing cleaning and evaluating corrosion test specimens, ASTM International, Reapproved.
- ASTM G31-12a, (2012). Standard guide for laboratory immersion corrosion testing of metals, NACE TM 0169, ASTM International.
- ASTM G48, (2015). Standard test methods for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels and related alloys by use of ferric chloride solution, ASTM International, Reapproved.
- ASTM E562-11. (2011). Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count;ASM International: Almere, The Netherlands.
- ASTM E1245 (2008). Standard Practice for Determining the Inclusion or Second Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis; ASM International: Almere, The Netherlands.
- AWS A5.9, (2017). 'Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods', American Welding Society.
- Corrosion of stainless steel weldments, ASM Handbook, Vol. 13-A. (2003). Corrosion: Fundamentals, testing and protection, ASM Int. p. 301-316.
- Douglas W. Dietrich, (1997). Magnetically Soft Materials, Properties and Selection, Non-ferrous materials and special purpose materials, pp. 2226, ASM Handbook Vol. 2, ASM International.
- EN ISO 8249. (2000). Welding-Determination of Ferrite Number (FN) in Austenitic and Duplex Ferritic-Austenitic Cr-Ni Stainless Steel Weld Metals; European Standard: Brussels, Belgium.
- EN ISO 14343, (2017). Welding consumables, Wire electrodes, strip electrodes, wires and rods for arc welding of stainless and heat resisting steels, International Standard.
- EN ISO 17655. (2003). Destructive Tests on Welds in Metallic Materials-Method for Taking Samples for Delta Ferrite Measurement; European Standard: Brussels, Belgium.
- George F. et all, (2004). Metallography and Microstructures, ASM Metals Handbook Vol. 9, ASM International, p. 670-700, USA.
- H.C. Dey, M. Ashfaq, A.K. Bhaduri, K.P. Rao, (2009). Joining of titanium to 304L stainless steel by friction welding, Journal of Materials Processing Technology, 209 5862–5870, Elsevier, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2009.06.018.
- H.M. Soltani, M. Tayebi, (2018). Comparative study of AISI 304L to AISI 316L stainless steels joints by TIG and Nd:YAG laser welding, Journal of Alloys and Compounds, 767 pp.112-121, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.06.302.

ISO 15614-1, (2017). Specification and qualification of welding procedures for metallic materials, Welding procedure test Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys, Second Edition, International Standard.

Jastej Singh, A.S. Shahi, (2018). Weld joint design and thermal aging influence on the metallurgical, sensitization and pitting corrosion behavior of AISI 304L stainless steel welds, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 33, pp. 126-135,doi: 10.1016/j.jmapro.2018.05.004,

J.C. Lippold, D. Kotecki, (2005). *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, Wiley Interscience, pp. 56-57.

Jie Jiang, Dake Xu, Tong Xi, M. Babar Shahzad, M. Saleem Khan, Jinlong Zhao, Xinmin Fana, Chunguang Yang, Tingyue Gu, Ke Yang, (2016). *Corrosion Science*, 113 46–56, doi: 10.1016/j.corsci.2016.10.003.

Kou S. (2002). *Welding Metallurgy*, 2nd ed. Wiley Interscience Publications, Hoboken, NJ, USA.

M.M.A. Khan, L. Romoli, M. Fiaschi, G. Dini, F. Sarri, (2012). Laser beam welding of dissimilar stainless steels in a fillet joint configuration, *Journal of Materials Processing Technology*, doi:10.1016/j.jmatprotec.2011.11.011.

N. Kumar, M. Mukherjee, A. Bandyopadhyay, (2017). Comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 304 and AISI 316 stainless steels, *Optics & Laser Technology*, Elsevier, 88 24–39, doi: 10.1016/j.optlastec.2016.08.018.

Pierre R. Roberge, (2000). *Handbook of Corrosion Engineering*, Chapter 8, Materials Selection, McGraw Hill Publications, p. 716.



Sabit Cisme Çarpmaya Bağlı Trafik Kazalarında Etkili Parametrelerin Faktöriyel Tasarım Yöntemi ile Belirlenmesi

Determination of the Parameters Effective in Traffic Accidents with Fixed Objects by Factorial Design Method

Merve Burçin Cenikli¹ , Ali Payıdar Akgüngör² 

¹ Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Toplu Konut İdaresi Başkanlığı, Ankara, TÜRKİYE

² Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71451 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru / Received: 11/09/2019

Kabul / Accepted: 25/10/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 04/11/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Duyarlılık analizi, seçilen modele ait birbirinden bağımsız değişkenlerin tekil etkilerini ya da bu değişkenlerin birbiri ile etkileşimlerinin model üzerindeki etkisini görmek üzere geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu çalışmada ortalama günlük trafik hacmi (ADT), şerit genişliği (W), yol kenarı alanı (C), sabit nesnenin banketten uzaklığı (D), arazi durumu (T) parametrelerini içeren 5 değişkene sahip bir kaza modeline ait parametrelerin kaza üzerindeki tekli ve çoklu etkileşimleri faktöriyel tasarım metodu ile belirlenmiş ve çözüm önerileri sunulmuştur. Etkili parametrelerin belirlenmesinde faktöriyel tasarım esaslarına göre hesaplanan parametre etkileri ve bunların etkileşimleri Box ve diğ. tarafından belirtilen şekilde normal dağılım grafiğinde gösterilerek ve mutlak standart sapmaların Henderson-Sellers tarafından kullanıldığı şekilde birincil ve ikincil olarak kategorize edilerek belirlenmiştir. Modele ait tekil parametreler içinde parametre etkisi en fazla olan değişken sırasıyla ortalama günlük trafik hacmi (ADT), sabit nesnenin banketten uzaklığı (D) ve şerit genişliği (W) olarak bulunmuştur. Çoklu etkileşimler göz önüne alındığında ise şerit genişliği-sabit nesnenin banketten uzaklığı (W-D) ve ortalama günlük trafik hacmi-sabit nesnenin banketten uzaklığı (ADT-D) birlikteliğinin etkisinin sabit bir cisme çarpa şeklinde meydana gelen kazalarda en etkili parametre etkileşimi olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“Trafik kaza modeli, faktöriyel tasarım yöntemi, duyarlılık analizi, ortalama günlük trafik “

Abstract

The sensitivity analysis is a method developed to examine the singular impacts of independent variables or the impacts of interactive relations between the independent variables on a selected model. In this study, the single and multiple interactions of parameters on an accident model with 5 variables including average daily traffic volume (ADT), lane width (W), roadside area (C), the distance of fixed positioned object to shoulder (D) and terrain condition (T) are determined by factorial design method and solutions are offered. In the determination of the effective parameters, parameter affects and their interactions calculated according to factorial design method principles are shown on the normal distribution graphic as it is addressed by Box et al. and categorized as primary and secondary importance in respect to use of absolute standard deviation by Henderson-Sellers. The most effective singular parameter variables related to the model are stated as average daily traffic volume (ADT), the distance of fixed positioned object to shoulder (D) and lane width (W), respectively. Considering the multiple interactions, lane width-the distance of fixed positioned object to shoulder (W-D) and average daily traffic volume-the distance of fixed positioned object to shoulder (ADT-D) association effects are indicated as the most effective parameter interactions for fixed object accidents.

Key Words

“Traffic accident model, factorial design method, sensitivity analysis, average daily traffic.”

1. Giriş

Hareketliliğin arttığı dünyamızda trafik her geçen gün yaşantımızı kolaylaştırıcı bir etkiye sahip olurken aynı zamanda ciddi bir sorun da oluşturmaktadır. Ülkemizde araç sahipliği hızla artmakta ve bu durum trafik sıkışıklığını, hava kirliliğini, trafikte geçen zaman kaybındaki artışı ve trafik kazalarını beraberinde getirmektedir. Ülkemiz farklı ulaştırma sistemlerine sahip olmasına rağmen en yoğun olarak kullanılan sistem karayolu ulaştırma sistemidir. Ülkemizdeki ulaştırma yük ve yolcu taşımacılığı olarak iki sınıfta incelendiğinde, yük taşımacılığı sınıfında sırası ile karayolu ulaşımı %89.20, denizyolu ulaşımı %6.00, demiryolu ulaşımı %4.80 ve yolcu taşımacılığında karayolu ulaşımı %88.80, denizyolu ulaşımı %0.60, demiryolu ulaşımı %1.20 ve havayolu ulaşımına %9.40 oranında ağırlık göstermiştir (KGM, 2018). İstatistiki verilerden de anlaşıldığı üzere ülkemizde karayolu ağırlıklı bir ulaştırma sistemi mevcuttur ki bu da trafik kazalarının her geçen gün artmasına neden olmaktadır. Trafik kazaları, hem sebep oldukları can kayıpları hem de ekonomiye getirdiği yük açısından ülkemiz için önemli bir toplumsal sorundur. Dünya Bankasının yaptığı bir araştırmaya göre Türkiye'nin trafik kazaları sonucunda meydana gelen zararların sosyo-ekonomik maliyeti Gayri Safi Milli Hasılanın yaklaşık % 2,2'sini oluşturmaktadır (Çarıkçı,2013).

Yol tasarımı ile ilgili planlama ve geliştirilecek yeni projeler için trafik güvenliği ile ilgili yapılmış çalışmalar ve kaza tahmin modelleri önemli bir kaynak oluşturmaktadır. Gelecekteki trafik güvenliği politikaları oluşturulmasında ve trafik güvenliği ile ilgili çalışmalarda istatistiki veriler ve kaza tahmin modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde farklı unsurları içerisinde barındıran birçok kaza modeli bulunmaktadır. Ancak,1938 yılındaki birçok ülke verileri kullanılarak ölüm, araç sayısı ve nüfus parametrelerini içeren ve Smeed(1968) tarafından geliştirilen Denklem 1' de verilen trafik kaza modeli literatürde yer alan en eski modellerden birisidir.

$$F=k.M^{0,33}.I^{0,67} \quad (1)$$

F : Ölü sayısı

M :Araç sayısı

I :Nüfus

k : Ülke bazında değişen katsayı

Denklem 1'de gösterilen bu model literatürde Smeed Kanunu olarak da bilinmektedir. Ancak bu modelde verilerin bir yıllık olması ve ülkeler bazında değişkenlik gösterebilmesinden dolayı Andreassen (1985) tarafından eleştirilmiş ve farklı bir model önerilmiştir. Mekky (1985) gelişmekte olan ülkelerde hızlı artan araç sahipliği ile beraber artan ölüm oranı arasındaki ilişkiyi incelemiş ve bir model geliştirmiştir. Partyka (1984) ise iş ve nüfus verilerine bağlı bir kaza modeli önermiştir. Valli (2005) Hindistan ve büyük şehirleri için Smeed ve Andreassen modelleri yardımıyla yeni kaza tahmin modelleri önererek kaza ve ölüm sayıları hakkında tahminlerde bulunmuştur. Yine benzer şekilde Akgüngör ve Doğan (2008) Smeed ve Andreassen modelleri yardımıyla Türkiye'de kullanılmak üzere kaza, ölü ve yaralı sayılarını tahmin eden kaza tahmin modelleri geliştirmişlerdir. Bir başka çalışmada ise Camkesen (1998) İstanbul'da belirlenen kesitlerde meydana gelen kazaları alan yöntemi ile incelenmiş ve kaza raporlarına göre simülasyon modelleme metodu kullanılarak kaza modelleri geliştirmiştir. Mirasyedi (2006) ise çalışmasında Türkiye'de meydana gelen kazalarla mevsimler arasındaki ilişkisini incelemiş ve regresyon analizi yardımıyla kaza modelleri geliştirerek her mevsim için yaralı –kaza sayısı eğrilerini oluşturmuştur. Yapay zeka teknikleri trafik kaza tahminlerinde de kullanılmış ve Bağırhan (2006) tarafından iki şeritli şehirlerarası bölünmemiş yollar için kazaya etki eden yol geometrik özellikleri bulanık mantık (fuzzy) yaklaşımı ile incelenerek yeni bir model önerilmiştir. Doğan (2007) regresyon analizi, yapay sinir ağları ve genetik algoritma teknikleri ile Türkiye'de meydana gelen kazalar için ölü ve yaralı sayılarını tahmin etmek üzere Smeed ve Andreassen model formlarını kullanarak kaza tahmin modelleri geliştirmiştir. Çalışmasında kazalara etki eden faktörleri inceleyerek, bu faktörlerin birbiri ile olan ilişkisini araştırmıştır. Bir diğer çalışmada ise Çodur (2012) Erzurum ili için kaza veri tabanı oluşturmuş ve bu veri sonuçları ile Yapay Sinir Ağları, Genelleştirilmiş Lineer Regresyon Analizi ve Coğrafi Bilgi Sistemleri yöntemleri karşılaştırılarak etkili parametreleri araştırmıştır. Diğer bir çalışmada ise literatürde birçok araştırmacı tarafından farklı kaza modelleri geliştirilse de Denklem 2'de verilen ve Zegeer ve diğ. (1987) tarafından geliştirilen model formu, trafik kazalar üzerinde etkili olan yol geometrisi, trafik parametreleri ve çevre faktörü etkisini (arazi yapısı) de göz önünde alması sebebiyle bu konuda yapılan en kapsamlı çalışmalardan birisidir.

$$KS=0.0019.(YOGT).(0,8786)^W.(0,9192)^{PA}.(0,9316)^{UP}.(1,2365)^H.(0,8822)^{TER1}.(1,3221)^{TER2} \quad (2)$$

Burada;

KS :Kaza sayısı(Kaza/Mil/Yıl)

YOGT:İki yöndeki yıllık ortalama günlük trafik(taşıt/gün)

W : Şerit genişliği(ft.)

PA : Kaplamalı banket genişliği (ft.)

UP : Kaplamasız banket genişliği(ft.)

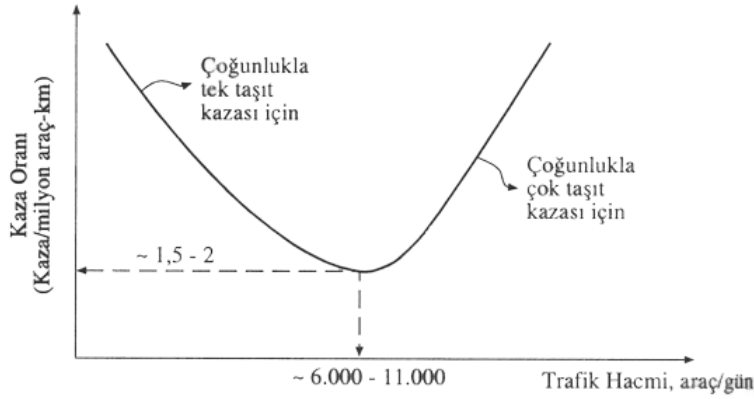
H : Yol Kenarı tehlike derecesi(1-7 aralığı)

TER1 : Düz arazi durumu için 1; diğer 0

TER2 : Engebeli arazi durumu için 1; diğer 0

Trafik kazalarının meydana gelmesinde kuşkusuz trafik hacmi önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle literatürde yapılan birçok çalışma ve geliştirilen kaza modelleri trafik hacmi üzerine yoğunlaşmıştır. Şekil.1'de görüldüğü üzere, YOGT ile kaza oranı arasında V harfine benzer bir ilişki görülmektedir. Trafik hacmi azken hıza bağlı olarak tek aracın karıştığı kaza sayısı artarken

trafik hacminin artmasıyla birlikte tek aracın karıştığı kazalar için kaza oranı azalmakta ancak, artan trafik hacminden dolayı çoklu araç kazalarına bağlı olarak kaza oranı artmaktadır. Çoklu taşıt kazaları daha çok çarpışma ve hacim artışından dolayı yoldan çıkma vb. sebeplerle oluşmaktadır.



Şekil 1. YOGT ile kaza oranı ilişkisi [Tunç, 2004]

Şerit genişliği, banket genişliği, platform genişliği, yol platformunun bölünmüş olup olmaması ve yol üzerinde bir kavşağın mevcut olup olmaması, yatay düşey kurların varlığı ve bu kurların yarıçapları, yol yüzeyinin yapısı ve eğimi gibi yol ile ilgili faktörlerde kaza oluşumunda etkili olan yol parametreleridir. Şerit genişliği yoldan çıkma, karşı yön ve aynı yönde çarpışma şeklindeki kazaları oldukça etkilemektedir. Şerit genişliği arttıkça kaza sayılarında azalma gözlemlenirken, hızla bağlı kazaların artışına da neden olabilmektedir. Kazalar için banketin varlığı, banket kaplamasının tipi ve banket genişliği önemli parametrelerdir. Yoğunluğu fazla bölünmemiş yollarda banket varlığı kaza sayısını azaltmaktadır. Banketlerin kaplamasız ve yol kotundan düşük olması durumunda bu unsur bir tehlike haline gelebilmektedir. Kaplamalı ve banket genişliği 1.8m.' nin üzerinde olması halinde ise kazaların bu şartlarda azalması beklenmektedir. Özellikle şerit genişliği az bölünmemiş bir yolda banket varlığı kazaları büyük ölçüde azaltmaktadır. Kaplamalı banketler kaplamasız olanlara kıyasla kontrolü sağlamak açısından kaza sayılarının azalmasında daha etkilidir. Akgüngör ve Yıldız (2007), kısmi faktöriyel metot yardımıyla Zegeer' in Denklem 2'de verilen kaza modelindeki parametrelerin duyarlılıklarını incelemişler ve inceleme neticesinde trafik hacmine ilave olarak şerit genişliğinin ve kaplamalı banket genişliğinin kazalar üzerinde etkili parametreler olduklarını tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada kullanılan yöntem olan duyarlılık analizi seçilen modele ait birbirinden bağımsız değişkenlerin tekil etkilerini ya da bu değişkenlerin birbiri ile etkileşimlerinin etkisini görmek üzere geliştirilmiştir. Duyarlılık analizlerinde her seferinde tek bir parametrenin değiştirildiği duyarlılık analizi en sık kullanılan yöntemdir. Ancak bu yöntemde sadece seçilen bir parametreye ait sınır değerlerin değiştirilmesi ile model sonuçları değerlendirilmektedir. Bu nedenle parametrelerin birbiri ile etkileşimlerinin görülebilmesi bu yöntemin en olumsuz yanıdır. Faktöriyel Tasarım Metodu ise bir duyarlılık analizi olarak Box ve diğerleri tarafından geliştirilmiş olup diğer birçok analiz yönteminden farklı olarak parametrelerin birbiri ile etkileşimlerini de göz önüne almaktadır (Box vd. 1978). Faktöriyel tasarım metodu bir modele ait hem tekil parametrelerin etkilerinin incelenmesine hem de bu parametrelerin birbiri ile olan etkileşimlerinin açığa çıkartılmasına olanak sağlamaktadır.

Tarım alanındaki deneysel tasarım araştırmaları için ilk kez faktöriyel tasarım kavramı 1930'lu yıllara dayanmakla birlikte Box ve diğ. tarafından Faktöriyel tasarım metodu geliştirilmiş ve diğer birçok araştırmacı (Henderson-Sellers, 1992 ve 1993; Liang, 1994; Yıldız, 2001; Akgüngör vd. , 2006, Akgüngör, 2011, Akgüngör ve Korkmaz, 2018) tarafından da farklı birçok alanda kullanılmıştır. Faktöriyel tasarım metodu farklı alanlarda kullanılmakla beraber yaygın olarak biyoloji, tıp, kozmetik, tekstil ve mühendislik alanlarında kullanılmaktadır. Sayısız deneyler yapılarak ulaşılabilecek sonuçların faktöriyel tasarım metoduyla oluşturulacak modeller sonucunda ortaya koyulan etkili unsurlar çerçevesinde ele alınarak az sayıda sonuç odaklı çalışmalar yapılmasına olanak sağlamaktadır.

2.Faktöriyel Tasarım Yöntemi

Faktöriyel tasarımlar, denemeler ve bunların birbiri arasındaki kombinasyonlarından oluşmaktadır. Parametreler ve her bir parametre için seçilen düzeylerin iki seviyesi olmaktadır. Bu seviyeler minimum ve maksimum değerler ya da bir parametrenin varlığının olması / olmaması şeklinde ifade edilebilir. Parametre düzeylerinin alt ve üst sınır değerler olduğu bir model için hesaplanan sonuçlar kullanılarak oluşturulan tekil ve çoğul parametre etkileri Normal Dağılım Grafiğinde gösterilerek Box ve diğ. tarafından belirtilen şekilde; yani doğrusal dağılım gösteren tekil yada çoğul parametre etkileşimleri etkisiz iken, doğrudan sapsmiş olan parametre yada parametre etkileşimlerinin modele dair etkili değerler olarak yorumlanır.

Bir modelde k adet parametre ve bu parametrelere ait iki düzey dikkate alınacak ise modele dair 2^k adet deneme olacaktır. Bir başka deyişle 2^k değerinde 2 düzey sayını, k ise faktör/parametre sayısını ifade etmektedir. Dört değişkenli bir model için bu durum şu şekilde açıklanabilir. X, Y, Z, W değişkenlerine ve iki düzeye sahip modelde $2^4=16$ adet deneme olmalıdır. Bu dört parametrenin birbiri ile çoklu etkileşimleri ise (XY), (YZ), (XW), (YZ), (YW), (ZW), (XYZ),(XYW), (XZW), (YZW), (XYZW) şeklinde olmaktadır. Tekil parametrelerin tasarım matrisi Tablo 1.' de gösterilmektedir. Bu matristeki örnekler ile şu şekilde açıklanabilmektedir. Düzey olarak alt ve üst değerler seçilmiş ise 1. deneme olan β_1 denemesi için X,Y,Z ve W faktörleri için

seçilen modelde alt değerler kullanılacakken, β_2 denemesi için X faktörü üst değer Y,Z ve W faktörleri için alt değer kullanılacaktır. Tablo 1’de görülen tekli parametreler için faktöriyel tasarım matrisi değerleri “1” katsayısının işaretleri şeklindedir ve X, Y, Z ve W parametrelerinin birbirleri ile etkileşimleri ve hesaplama matrisi Tablo 2 ile gösterildiği şekilde tekli parametre değerlerinin matematiksel olarak çarpımından oluşmaktadır.

Tablo 1. Tekli parametreler için faktöriyel tasarım matrisi

Deneme	X	Y	Z	W	β
1	-	-	-	-	β_1
2	+	-	-	-	β_2
3	-	+	-	-	β_3
4	+	+	-	-	β_4
5	-	-	+	-	β_5
6	+	-	+	-	β_6
7	-	+	+	-	β_7
8	+	+	+	-	β_8
9	-	-	-	+	β_9
10	+	-	-	+	β_{10}
11	-	+	-	+	β_{11}
12	+	+	-	+	β_{12}
13	-	-	+	+	β_{13}
14	+	-	+	+	β_{14}
15	-	+	+	+	β_{15}
16	+	+	+	+	β_{16}

Tablo 2. Çoklu parametreler için faktöriyel tasarım düzeyleri matrisi.

Deneme	XY	XZ	XW	YZ	YW	ZW	XYZ	XYW	XZW	YZW	XYZW
1	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
2	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
3	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-
4	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+
5	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-
6	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
7	-	-	+	+	-	-	-	+	-	-	+
8	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-
9	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
10	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+
11	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
12	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-
13	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+
14	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-
15	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Bu dört faktörün iki düzeyindeki model için $16 \times 11 = 176$ adet deney yapılması gerekmektedir ki bu sayı faktör ve düzey sayısının artması ile ciddi boyutta artabilir ve bu durum maddi olumsuzlukları beraberinde getirmektedir. Faktöriyel tasarım metodu ile modele etki eden düşük ve yüksek etkili parametrelerin belirlenmesi mümkün olacaktır. Bir deneysel tasarımda gerekli olan sınırlı sayıdaki deneme yapılarak para ve zaman boyutlarındaki kayıp azalacaktır.

Bu çalışmada oluşturulan modelde faktörlere ait maksimum ve minimum parametre değerleri olacak şekilde iki düzey esas alınmıştır. Çoklu etkileşim matrisinin oluşturulmasının ardından X, Y, Z ve W faktörlerine ait alt ve üst değerleri belirlenmelidir. Tekil ve çoğul matrislerde (-) işareti minimum değeri, (+) işareti ise maksimum değeri göstermektedir (Denklem 3).

$$E_j = [\sum_i^k S_{ij} \cdot R_i] / N_j \quad (3)$$

Denklem 3’deki E_j değeri ile her tekil parametrenin ve çoğul etkileşimlerinin modele dair etkileri görülebilir. E_j , parametrenin etkisini, k deneme sayısını ($k=16$ yukarıda görülen örnek için); S_{ij} “i” satırı ve “j” kolonunun işaretini, R_i i. deneme ye ait belirlenen sınır değerler için modele ait sonucu ve N_j “j” kolonundaki “+” işaretlerin sayısını göstermektedir. Seçilen modele ait etkili parametreler belirlenerek Box ve diğ. tarafından belirtildiği şekilde Normal Dağılım Grafiği çizilerek doğrusal değerlerin dışında kalan parametrelerin etkin olduğu belirlenmekte ve bu parametreler hakkında gerekli çalışmalar yapılarak sonuca ulaşılmış olunacaktır. Modellere dair uygulanabilecek diğer bir yöntem ise tanımlanan parametreler Henderson-Sellers tarafından kullanılan şekilde birincil ve ikincil derecede öneme sahip olarak kategorize etmektir (Henderson vd.,1992). Bu kategori sıralaması hesaplanan mutlak standart sapmaların ölçüğüne göre belirlenmektedir.

3. Beş faktörlü ve sabit cisimle çarpışma şeklindeki kazalar için geliştirilen bir kaza modelin incelemesi

Duyarlılık analizi için Denklem 4’de verilen kaza modeline iki seviyeli faktöriyel tasarım uygulanmıştır. Bu amaç için modele ait beş parametrenin kullanılan alt ve üst sınır değerleri Tablo3 de verilmiştir. Faktöriyel tasarım metodu esaslarına göre Tablo 1. ve 2.’de belirtildiği şekilde parametrelere dair tekil tasarım ve hesap matrisi oluşturulmuş olup modele ait tekil tasarım matrisi Tablo 4’de verilmektedir

$$CO = 0,00002 * ADT * 0,88 W * 1,10 C * 0,86 D * 1,2 T \quad (4)$$

Burada

ADT: Ortalama günlük trafik hacmi (araç/gün)

W : Şerit genişliği (feet)

C : Yol kenarı alanı (%)

D : Sabit nesnenin banketten uzaklığı (feet)

T : Arazi durumu

olarak ifade edilmektedir.

Tablo 3. Model parametreleri ve parametreler için seçilen alt–üst değerler.

Parametre No	Parametre Adı	Sembol	Alt Değer	Üst Değer
1	Ortalama günlük trafik hacmi	ADT	500	10.000
2	Şerit genişliği	W	8	12
3	Yol kenarı alanı	C	0,10	0,30
4	Sabit nesnenin banketten uzaklığı	D	1	12
5	Arazi durumu (Dağlık 1, diğer 0)	T	0	1

Tablo 4. Parametrelere dair tekil tasarım matrisi

Deneme	1(ADT)	2(W)	3(C)	4(D)	5(T)
1	-	-	-	-	-
2	+	-	-	-	-
3	-	+	-	-	-
4	+	+	-	-	-
5	-	-	+	-	-
6	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-
8	+	+	+	-	-
9	-	-	-	+	-
10	+	+	-	+	-
11	-	+	-	+	-
12	+	+	-	+	-
13	-	-	+	+	-
14	+	-	+	+	-
15	-	+	+	+	-
16	+	+	+	+	-
17	-	-	-	-	+
18	+	-	-	-	+
19	-	+	-	-	+
20	+	+	-	-	+
21	-	-	+	-	+
22	+	-	+	-	+
23	-	+	+	-	+
24	+	+	+	-	+
25	-	-	-	+	+
26	+	-	-	+	+
27	-	+	-	+	+
28	+	+	-	+	+
29	-	-	+	+	+
30	+	-	+	+	+
31	-	+	+	+	+
32	+	+	+	+	+

Tablo 5. Hesaplama matrisi ve çoklu parametre etkileri

Deneme	12	13	14	15	23	24	25	34	35	45	123	124	125	134	135	145	234	235	245	345	1234	1235	1245	1345	2345	12345	
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	
2	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+
3	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	+
4	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-
5	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	+
6	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	-	-
7	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	+	-
8	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+
9	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	-	+
10	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-
11	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	-	+	-	+	-
12	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+
13	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-
14	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+	+
15	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	+
16	+	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
17	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
18	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-
19	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	+	-	+	-	-	-	+	-
20	+	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+
21	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-	+	+	-
22	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	+
23	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+
24	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
25	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	-
26	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+
27	-	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+
28	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-
29	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+
30	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-
31	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-
32	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

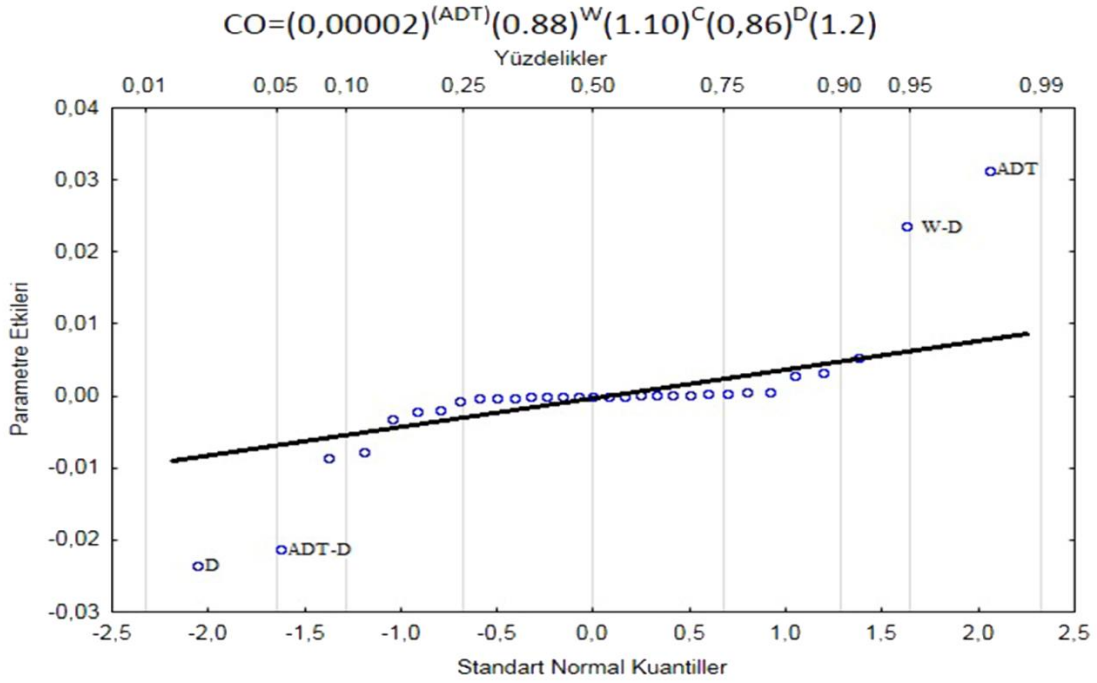
Tablo 5’de ortalama günlük trafik hacmi, şerit genişliği, yol kenarı alanı, sabit nesnenin banketten uzaklığı ve arazi durumu parametreleri için etkileşim parametreleri, tekil parametre matrisindeki duyarlılık işaretlerinin cebirsel çarpımı olacak şekilde hesaplama matrisi oluşturulmuştur.

Model parametrelerine ait iki düzeyli faktöriyel tasarım metodu uygulanarak her bir parametre için Tablo 3’ de belirtilen maksimum ve minimum değerler için modele ait kaza sayıları hesaplanarak tekli-çoğul parametre etkileşimlerinin kaza sayısı ile ilişkileri ise Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Parametre etkileri

Deneme No	Kaza Sayısı	Parametre ve Etkileşimleri	Parametre Etkileri	Mutlak Sapma
1	0,0031	1	0,03136	3,71671
2	0,0624	2	-0,00867	1,02796
3	0,0019	3	0,00033	0,03915
4	0,0375	4	-0,02358	2,79431
5	0,0032	5	0,00315	0,37345
6	0,0637	12	-0,00785	0,93006
7	0,0019	13	0,00030	0,03542
8	0,0382	14	-0,02134	2,52819
9	0,0006	15	0,00285	0,33788
10	0,0119	23	-0,00033	0,03915
11	0,0004	24	0,02358	2,79431
12	0,0071	25	-0,00315	0,37345
13	0,0006	34	-0,00022	0,02663
14	0,0121	35	0,00003	0,00356
15	0,0004	45	-0,00214	0,25403
16	0,0073	123	-0,00007	0,00886
17	0,0037	124	0,00534	0,63265
18	0,0749	125	-0,00071	0,08455
19	0,0022	134	-0,00020	0,02410
20	0,0449	135	0,00003	0,00322
21	0,0038	145	-0,00194	0,22984
22	0,0764	234	0,00006	0,00666
23	0,0023	235	-0,00001	0,00089
24	0,0458	245	0,00054	0,06357
25	0,0007	345	-0,00002	0,00242
26	0,0143	1234	0,00005	0,00603
27	0,0004	1235	-0,00001	0,00081
28	0,0086	1245	0,00049	0,05751
29	0,0007	1345	-0,00002	0,00219
30	0,0145	2345	0,00001	0,00061
31	0,0004	12345	0,00000	0,00055
32	0,0087			

Tablo 6’de hesaplanan parametre etkileri Box ve diğ. belirttiği şekilde normal olasılık ölçeğinde grafik ortamına geçirilerek Şekil 2 oluşturulmuştur. Şekil 2’den de görüleceği üzere parametre etkileri normal dağılım grafiğinde gösterilmiş olup bu grafik yardımı ile modele dair en etkili tekil ve çoğul parametrelerin bulunması amaçlanmıştır. Modele ait tekil parametre etkisi en fazla olan faktörler sırasıyla ADT (Ortalama günlük trafik hacmi), D (Sabit nesnenin banketten uzaklığı) şeklinde bulunmuştur. Çoğul etkileşimler göz önüne alındığında ise Şerit genişliği-Sabit nesnenin banketten uzaklığı (W-D) ve ortalama günlük trafik hacmi-sabit nesnenin banketten uzaklığı (ADT-D) birlikteliğinin etkisi görülmektedir.



Şekil 2. Beş faktörlü (Sabit cisimle çarpışma şeklindeki kazalar) modeli için normal olasılık ölçeğinde çizilen parametre etkileri

Modele ait parametre etkilerini belirlemede kullanılan ve diğer bir yöntem olan mutlak standart sapmalara göre (Henderson-Sellers tarafından kullanıldığı şekilde) model parametreleri birincil ve ikincil olarak kategorize edilmiştir. Mutlak standart sapmalara göre kategorize edildiğinde sabit bir cisime çarpma şeklinde oluşan kazalar için Tablo 6 ve 7'den de görüleceği üzere tekil parametreler için $|4\sigma|$ (4 standart sapma) değerine sahip en etkili tekil parametre ADT (Ortalama günlük trafik hacmi), ikincil olarak $|3\sigma|$ (3 standart sapma) değerine sahip D (Sabit nesnenin banketten uzaklığı) ve $|\sigma|$ (1 standart sapma) değerine sahip W (Şerit genişliği) bulunmuştur. Çoklu parametre etkileşimlerinde ise W-D (Şerit genişliği-Sabit nesnenin banketten uzaklığı) birlikteliği ile ADT-D (Ortalama günlük trafik hacmi-Sabit nesnenin banketten uzaklığı) birlikteliği bulunmuştur.

Tablo 7. Parametreler için $|\sigma|$, $|3\sigma|$ ve $|4\sigma|$ değerlerindeki etkiler.

Parametreler	1. Derece Etkili $ 4\sigma $	2. Derece Etkili	
		$ 3\sigma $	$ \sigma $
ADT	Ortalama günlük trafik hacmi	√	
D	Sabit nesnenin banketten uzaklığı		√
W-D	Şerit genişliği-Sabit nesnenin banketten uzaklığı		√
ADT-D	Ortalama günlük trafik hacmi-Sabit nesnenin banketten uzaklığı		√
W	Şerit genişliği		√

4. Sonuçlar

Bu çalışma sabit cisime çarpma şeklinde gerçekleşen kazalara dair ortalama günlük trafik hacmi, şerit genişliği, yol kenarı alanı, sabit nesnenin banketten uzaklığı, arazi durumu parametrelerini içeren seçilen model için faktöriyel tasarım yöntemi yardımıyla en etkili parametreyi tespit ederek trafik güvenliği adına en uygun çözüm önerisini sunmayı amaçlamıştır.

Sabit cisime çarpma şeklindeki kazalar için en etkili parametre olarak ortalama günlük trafik hacmi (ADT) bulunmuştur. İkincil olarak etkili parametreler standart sapma yöntemi aracılığı ile sabit nesnenin banketten uzaklığı (D) ve şerit genişliği (W) olurken çoklu etkileşimlerde ise şerit genişliği-sabit nesnenin banketten uzaklığı (W-D) ve ortalama günlük trafik hacmi-sabit nesnenin banketten uzaklığı (ADT-D) birlikteliği olduğu görülmüştür. Normal dağılım grafiği yöntemi ile standart sapma metodu aracılığıyla belirlenen etkili parametreler birbiri ile paralel olup; tekil etkide ortalama günlük trafik hacmi (ADT), sabit nesnenin

banketten uzaklığı (D), çoklu parametre etkileşimlerinde ise şerit genişliği-sabit nesnenin banketten uzaklığı (W-D) ve ortalama günlük trafik hacmi-sabit nesnenin banketten uzaklığı (ADT-D) bulunmuştur.

Bir yol üzerinde seyreden taşıt sayısının artması yolda meydana gelebilecek potansiyel kaza riskini de arttıracaktır. Bu nedenle çoğu kaza modellerine günlük trafik hacmi temel bir değişken olarak modellere dahil edilmiştir. Bu çalışmadan da elde edilen bulgular, kazaların meydana gelmesinde en etkili olan parametrenin kuşkusuz araç sayısı olduğunu doğrulamaktadır. Özellikle yol kenarında sabit bir cisme çarpma şeklinde meydana gelen kazaların önlenmesinde yol kenarındaki banketin varlığı, sonrasında ise banket ile cisim arasındaki mesafenin fazlalığı kazanın önlemede manevra kabiliyeti açısından önemlidir. Sabit cisme çarparak gerçekleşebilecek kazalarda sabit cismin banketten uzak olması ve şerit genişliğinin fazla olması halinde kaza olma olasılığı ve kaza şiddeti azalmaktadır. Yine aynı şekilde kaybedilen araç hakimiyeti şerit içerisinde ya da banket-cisim arasında kontrol altına alınabilmektedir. Bu nedenle yol kenarı ile ilgili tehlikesiz alanlar oluşturulması, banketin varlığı ve şerit genişliğinin trafik güvenliği üzerindeki etkisi dikkate alınarak projelendirilme yapılması kaza sayılarında önemli bir oranda azalmaları beraberinde getirecektir. Öte yandan sabit nesnenin bankete yakın olması veya banketin bulunmaması yoğun trafik hacmine sahip olan yollarda kaza riskini arttıracaktır.

Referanslar

Akgüngör, A.P., Yıldız, O., Demirel A., (2006) A sensitivity analysis of the HCM 2000 delay model with the factorial design method. Turkish Journal of Engineering and Environmental Science, 30(4), 259-267.

Akgüngör, A.P., Yıldız, O., (2007) Sensitivity analysis of an accident prediction model by the fractional factorial method. Accident Analysis and Prevention, 39(1), 63-68.

Akgüngör A.P., Doğan E., (2008). Smeed ve Andreassen kaza modellerinin Türkiye uygulaması: Farklı senaryo analizleri, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 23(4), 821-827.

Akgüngör A.P., (2011) Webster modeline ait parametrelerin gecikme üzerindeki etkisinin faktöriyel tasarım yöntemi ile incelenmesi, 9. Ulaştırma Kongresi, 16-18 Mayıs 2011, Beşiktaş, İstanbul.

Akgüngör, A. P., Korkmaz, E., (2018) Investigating parameter interactions with the factorial design method: Webster's optimal cycle length model, Technical Gazette, 25, Suppl. (2), 2018, 391-395 DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20170908185847>

Andreassen D.C., (1985). Linking deaths with vehicles and population, Traffic Engineering & Control, 26(11), 547-549.

Bağırhan N. (2006). Şehirlerarası karayollarında trafik güvenliği tahmini, Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Box, G.E.P., Hunter, W.G., Hunter, J.S., (1978), Statistics for experimenters: An introduction to design, data analysis and model building, Wiley and Sons.

Camkesen N., (1998) Trafik kaza analizleri ve kaza tahmin modelleri, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul,

Çarıkcı M.K. (2013). Bölünmüş yol çalışmalarının trafik kazaları üzerine etkisinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Çodur M.Y., (2012), Trafik kaza tahmin modelleri: Erzurum ili çevre karayolları için uygulamalar. Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.

Doğan E., (2007), Regresyon analizi ve yapay zekâ yaklaşımı ile Türkiye ve seçilen bazı büyük iller için trafik kaza tahmin modelleri, Yüksek lisans tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.

Henderson-Sellers, A., (1992), Assessing the sensitivity of a land surface scheme to parameters used in tropical deforestation experiments. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 118(508), 1101-1116

Henderson-Sellers, A., 1993. A factorial assessment of the sensitivity of the BATS land surface parameterization scheme. Journal of Climate 6 (2), 227-247

KGM, Trafik Kazaları Özeti (2018). Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara www.kgm.gov.tr

Liang, X., (1994), A two-layer variable infiltration capacity land surface representation for general circulation models. Water Resources Series Technical Report No. 140, University of Washington, Department of Civil Engineering Environmental Engineering and Science, Seattle, Washington, USA.

Mirasyyedi F., (2006). Mevsimlerin Türkiye'deki trafik kazalarına etkisinin incelenmesi ve kaza tahmin modelleri, Yüksek lisans tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.

Mekky A., (1985), Effect of rapid decrease in motorization levels on road fatality rates in some rich developing countries. *Accident Analysis and Prevention*, 17(2), 101-109.

Partyka C., (1984). Simple models of fatality trends using employment and population data, *Accident Analysis and Prevention*, 16(3), 211-222.

Smeed R.J., (1968), Variations in the pattern of accident rates in different countries and their causes. *Traffic Engineering & Control*, 10(7), 364-371.

Tunç. A., *Yol Güvenlik Mühendisliği ve Uygulamaları*, Asil Yayın Dağıtım, 1. Baskı, Ankara, 2004

Valli P.P, (2005). Road accident models for large metropolitan cities of India, *IATSS Research*, 29(1), 57-65.

Yildiz, O., (2001) Assessment and simulation of hydrologic extremes by a physically based spatially distributed hydrologic model. Ph.D. thesis. Pennsylvania State University, University Park, PA.

Zegeer, C.V., Reinfurt, D., Hummer, J., Herf, L., Hunter,W., (1987), Safety effect of cross-section design for two-lane roads. Vols. 1-2. Report FHWA-RD- 87/008 and 009 Federal Highway Administration, Department of Transportation, USA.



Production and Characterization Of Ti-10Cr-3,33Co-3,33Egg Shelter Composite Materials Using By Powder Metallurgy

Ahmet Yönetken*¹, Günnur Peşmen², Ayhan Erol³

¹Afyon Kocatepe University, Faculty of Engineering, Electrical Engineering, ANS campus, 03200, Afyonkarahisar, TURKEY

²Afyon Kocatepe University, Vocational College of Şuhut, 03830, Afyonkarahisar, TURKEY

³Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Metallurgy and Materials Engineering, ANS campus, 03200, Afyonkarahisar, TURKEY

Başvuru/Received: 24/10/2018

Kabul / Accepted: 30/07/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 10/12/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Abstract

Titanium based intermetallic compounds are frequently used in the production of biomaterials. The behavior of titanium similar to bone mechanical properties causes the use of titanium as a biomaterial and preferred among the materials. It also makes its use attractive in industrial applications at high temperatures. TiCrCo intermetallics are known to be used together with Ti matrix materials to improve the properties of the group in addition to elements such as Cr, especially Ti, Co, Mo and Fe in various application areas. This information is used frequently in the sintering process.

In this study, Ti-10Cr-3,33Co-3,33 egg shelter powders were prepared as a sample mixture. When the properties of the samples produced after sintering are examined, it shows the effects of Co on TiCr. 3.33% Co additive was used in the composition of the composition and mechanical properties were determined in the produced samples. By looking at metallographic analysis, structural features were tried to be determined. The density of the produced samples was calculated, hardness and shear strength were determined. According to the results of the analysis, 3.33% Co composition and 3.71 gr / cm³ density, and 285.5 HV hardness values at 1200 ° C were obtained..

KeyWords

“Sintering, intermetallic, Egg Shelter, Composite, High temperature.”

1. Introduction

In order to ensure sustainability in development, wastes must be recycled. Zero waste standards are a priority in environmental protection (Luengo et al. 2011). Agricultural waste utilization has made contributions to the many aspects of life such as its use as feedstock in the production of biobased products (Abdulrahman et al. 2014). Many agricultural wastes in the vicinity have been reported to be effective raw materials for the production of useful products (Xu et al., 2011; Boonpoke et al. 2013; Rashidi et al., 2012). Many researches on agricultural waste have primarily concerned with the use of energy potentials or its effective use (Ling and Teo, 2012; Surip et al., 2012; Zakaria et al. 2010; Peng et al., 2000). The eggshell is a protective barrier against the penetration of micro-organisms. The shell is a bioceramic composite material formed to protect the egg content (Neves, 1998; Boron 2004). Ceramics are widely used in cutting or cutting tools with high abrasion resistance (Yuhong et al., 2008; Upadhyaya and Bhaumik, 1998; Taheri and Mirhosseini, 2003). Electroless nickel plating is used especially in many industrial applications. The use of electroless nickel plating technique ensures homogeneous Ni distribution on the part to be coated in the bath. It plays an important role in preventing the non-uniform Ni coating in the electrolytic coating. Due to the increase in the sintering temperature of the samples, an increase in the ultrasonic properties except Poisson ratio was observed in both methods (Yönetken et al., 2019).

In the present work, Composites work Ti-10Cr-3,33Co-3,33 egg shelter powders were fabricated, microstructure was characterized, and mechanical properties such as hardness and density were studied. It was observed that the best properties the hardness 197,8 HV were obtained for 1200°C composite.

2. Preparation Of Sample

2.1 Material

Metallic powder properties used in this study are given below. The 99.8% purity and particle size Ti powders less than 70 μm , were obtained from Sigma Aldrich. Cr powders having 99.9% purity and a particle size less than 75 μm from Sigma Aldrich were used. Co powders having 99.8% purity and 2 μm particle size from Sigma Aldrich were used. Composition of Ti-10Cr-3,33Co-3,33 egg powders was prepared. Powder samples were shaped with 10g circular uniaxial press. After weighing, the composition mixture was mixed in a mixer for 24 hours to ensure that the composition was homogeneous. The mixture was shaped by uniaxial cold hydraulic pressing using a high-strength steel mold. It was made under a pressure of 300 bar to compress all powder mixtures. Cold pressed samples were sintered at 900 °C, 1000 °C, 1100 °C, 1200 °C, and 1300 °C for 2 hours in a conventional tube oven using an Argon gas atmosphere. After sintering, the samples were allowed to cool naturally under argon atmosphere in the oven. Micro hardness and shear strength of the samples were measured by METTEST-HT (Vickers) micro hardness tester, respectively. LEO 1430 VP equipped with the Oxford EDX analyzer in TUAM, was used for SEM microstructure and EDX analysis as a scanning electron microscope.

The density changes of the composite samples produced in Ti-10Cr-3,33Co-3,33 egg powders were calculated using the sintering composite samples ($d = m / V$) formula (Figure 1). The volume of sintered samples was measured by the Archimedes principle. All percentages and ratios were given in percent by weight.

2.2 Experimental Results and Discussion

In this section, the effect of chicken egg powders on the physical and mechanical properties of composite material production is investigated. The results of the samples produced in the study were characterized.

2.3 Characterization of Specimens

The composite samples prepared in the study were sintered in the traditional furnace at 900°C-1300°C and made ready for physical, mechanical, and metallographic analyzes. The density-temperature change curve is shown in Figure 1. The highest sintered density is obtained at 3,95g/cm³ in 1200°C. The lowest density of the composite samples is obtained as 3.52 g/cm³ at 900°C.

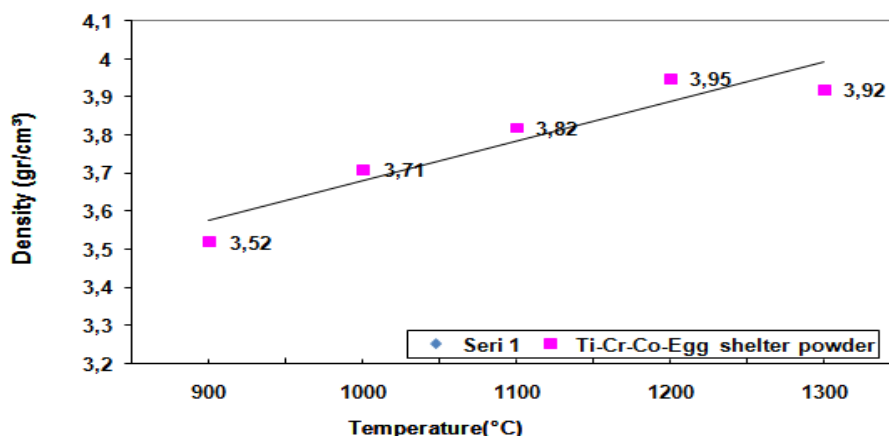


Figure 1. The temperature change with respect to composition at Ti-10Cr-3,33Co-3,33 egg shelter powders.

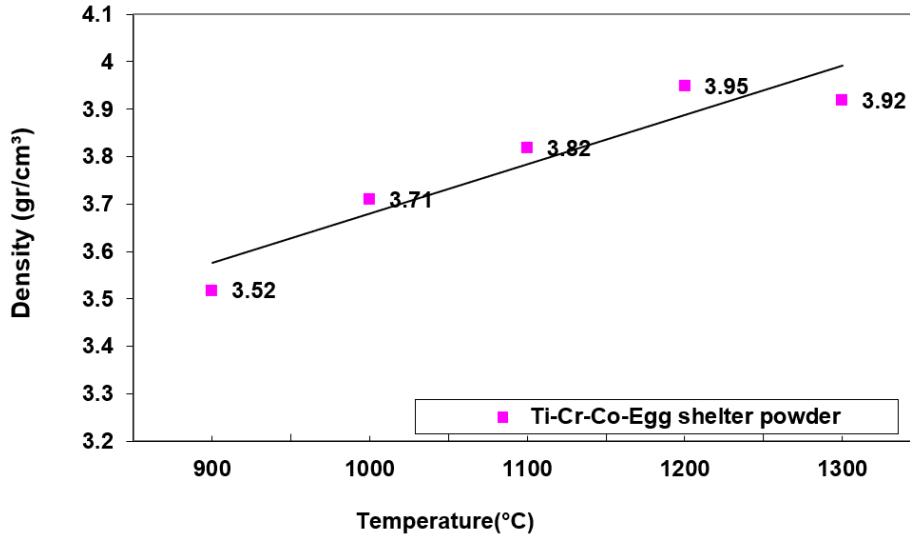


Figure 1 (cont.). The temperature change with respect to composition at Ti-10Cr-3,33Co-3,33 egg shelter powders.

The micro-hardness-temperature change diagram of the composite samples produced is given in Figure 2. Micro hardness values of the composite samples were produced in argon atmosphere using conventional sintering technique at 900°C-1300°C. Accordingly, the highest micro hardness value of the composite samples produced by the powder metallurgy method is measured as 197,8HV at 1200 °C.

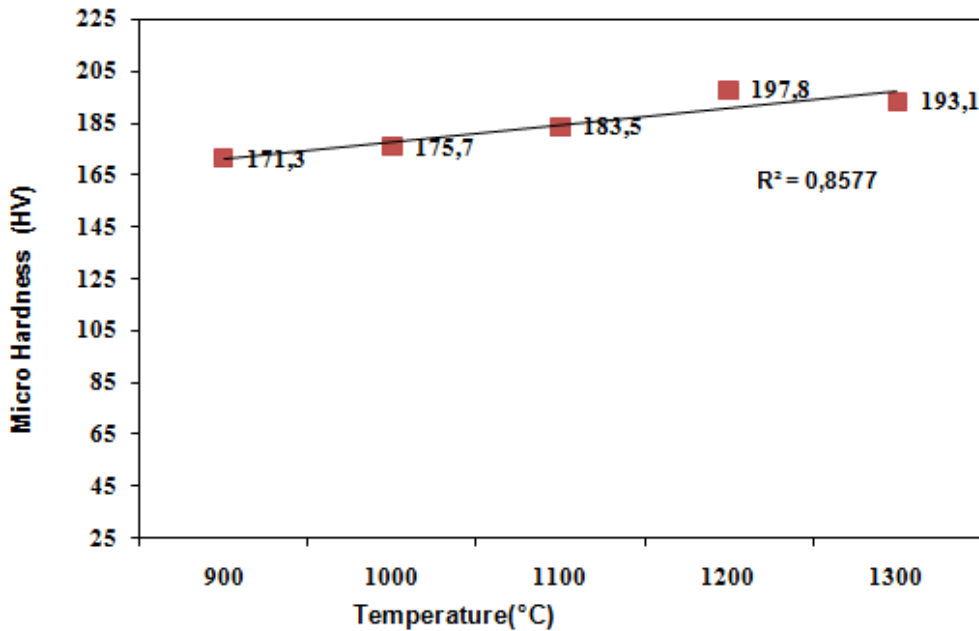


Figure 2. The Micro hardness change with respect to composition at Ti-10Cr-3,33Co-3,33 egg shelter powders.

3. Metallographic Analysis

Fig.3 shows the SEM image of Ti-10Cr-3,33Co-3,33Organic waste composite produced by sintering at 900 °C. Since the sintered sample is sintered at 900 °C, it is seen that the bonding of the particles with the diffusion bond is not realized due to the low sintering temperature.

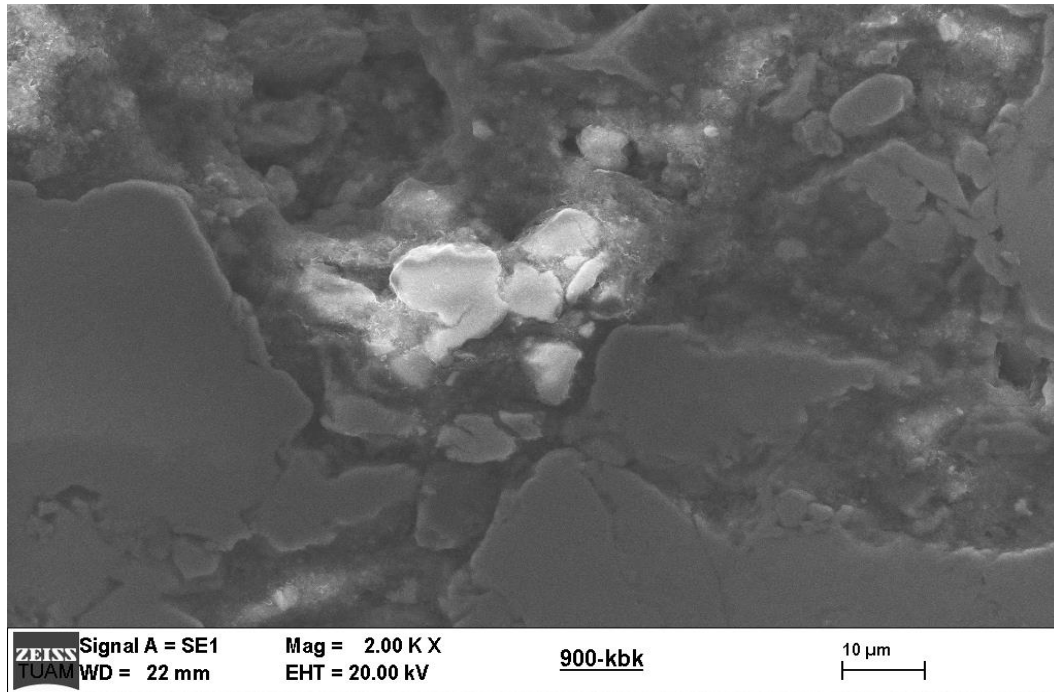


Figure 3. SEM view of Ti-10Cr-3,33Co-3,33 egg shelter composite at 900°C

Figure 4 shows the SEM image of Ti-10Cr-3,33Co-3,33egg shelter composite produced by sintering at 1000 °C. It is understood that a tighter bond between the particles is formed in the sample sintered at 1000 ° C. The picture has been observed. The grain boundaries are not fully formed in the SEM image.

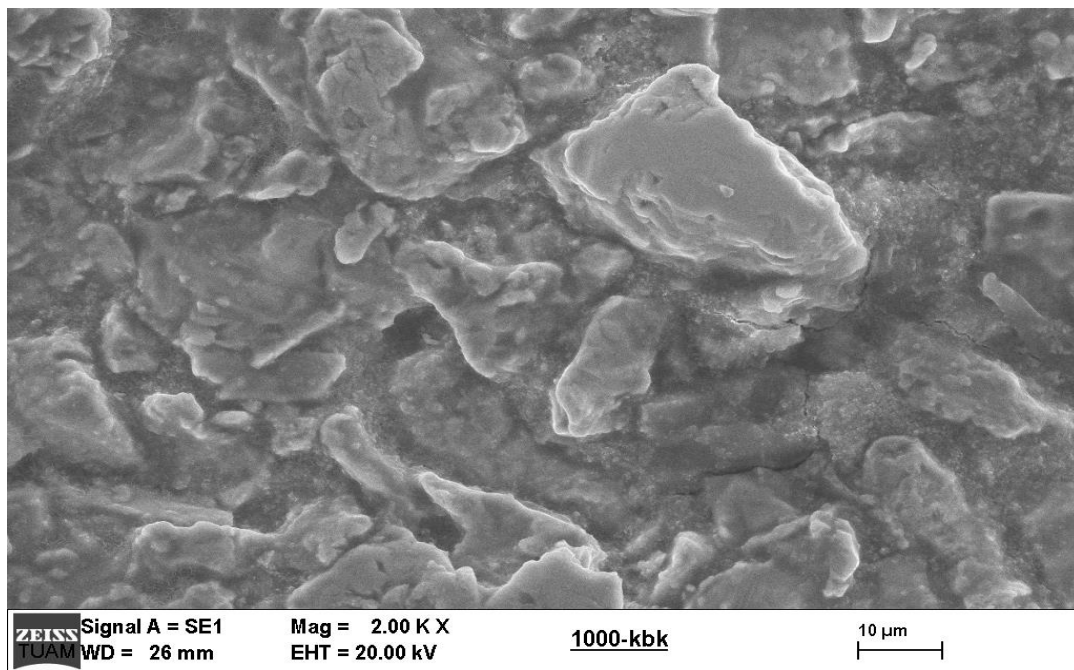


Figure 4. SEM view of Ti-10Cr-3,33Co-3,33egg shelter composite at 1000°C

Fig.5 shows the SEM image of Ti-10Cr-3,33Co-3,33egg shelter composite produced by sintering at 1100 °C. In the sample sintered at 1100 °C, the porosity decreased further at 1000 °C compared to the sintered sample. The grain size and porosity were clearly observed in the SEM analysis image.

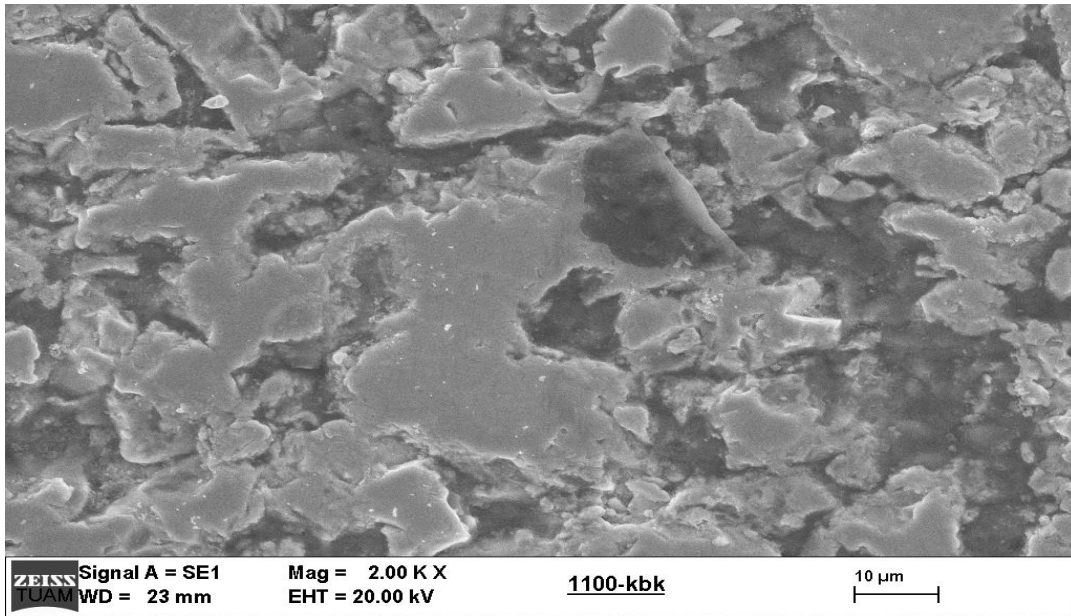


Figure 5. SEM view of Ti-10Cr-3,33Co-3,33egg shelter composite at 1100°C

Fig. 6 shows the SEM image of Ti-10Cr-3,33Co-3,33egg shelter composite produced by sintering at 1200 °C. In the sample sintered at 1200 °C, the porosity decreases even more at the lower temperatures compared to the sintered samples. The hardness measurements of the specimen produced at 1200 °C confirm the porosity of the hardness increase.

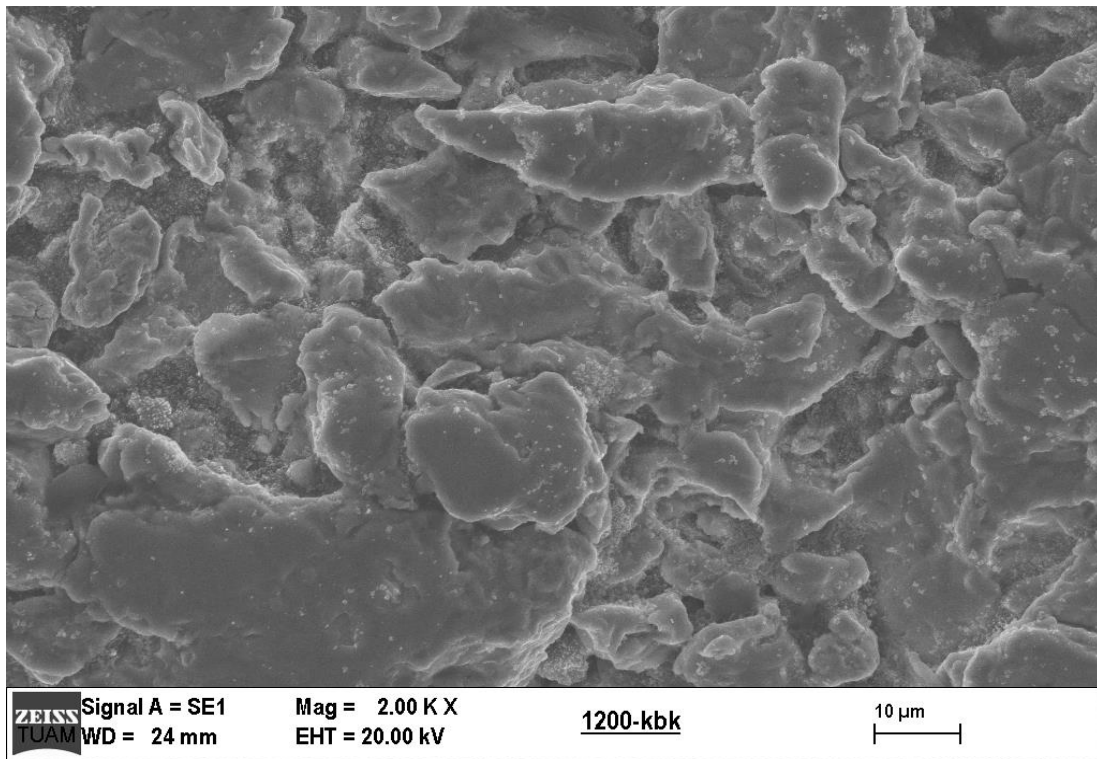


Figure 6. SEM view of Ti-10Cr-3,33Co-3,33egg shelter composite at 1200°C

Figure 7 shows the SEM image of Ti-10Cr-3,33Co-3,33egg shelter composite produced by sintering at 1300 °C. It is seen that the porosity decreases in the sample sintered at 1300 °C. In hardness measurements, it is observed that the hardness value of the sample produced at 1300 °C decreased.

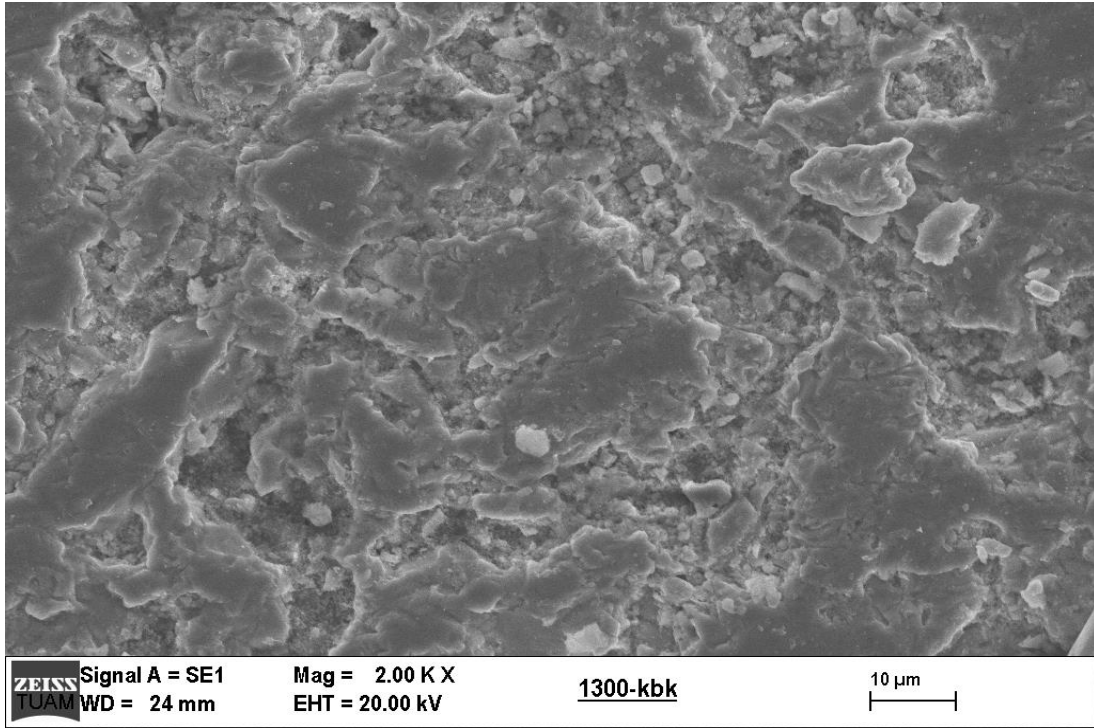


Figure 7. SEM view of Ti-10Cr-3,33Co-3,33egg shelter composite at 1300°C

Ti-10Cr-3,33Co-3,33egg shelter composition specimens were produced by sintering at 900 °C with powder metallurgy. XRD analysis of the composite sample is given. According to the results, Ti, Cr, Co, Cr₂Ti, and TiCr phases are determined.

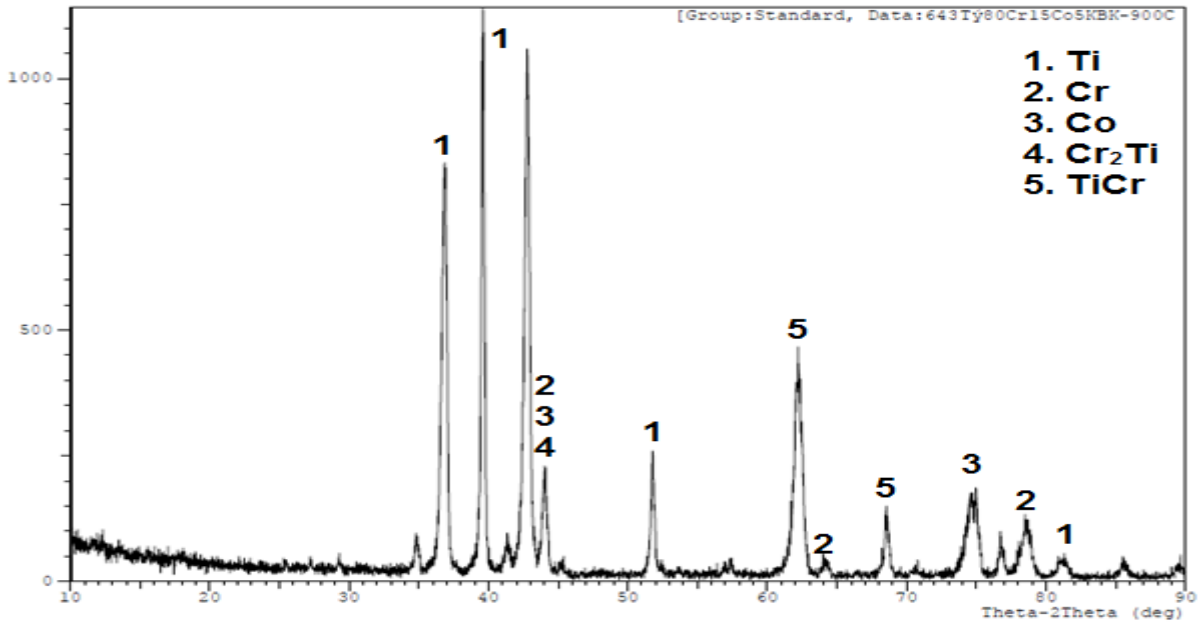


Figure 8. The XRD analysis results of Ti-10Cr-3,33Co-3,33egg shelter. composite at 900°C

Ti-10Cr-3,33Co-3,33egg shelter is produced by sintering at 1300 °C with powder metallurgy. XRD analysis of the composite sample is given. According to the results, Ti, Cr, Co, Cr₂Ti, and TiCr phases are formed. It is observed that the same peaks occur at different intensities in the sample produced at 900 °C.

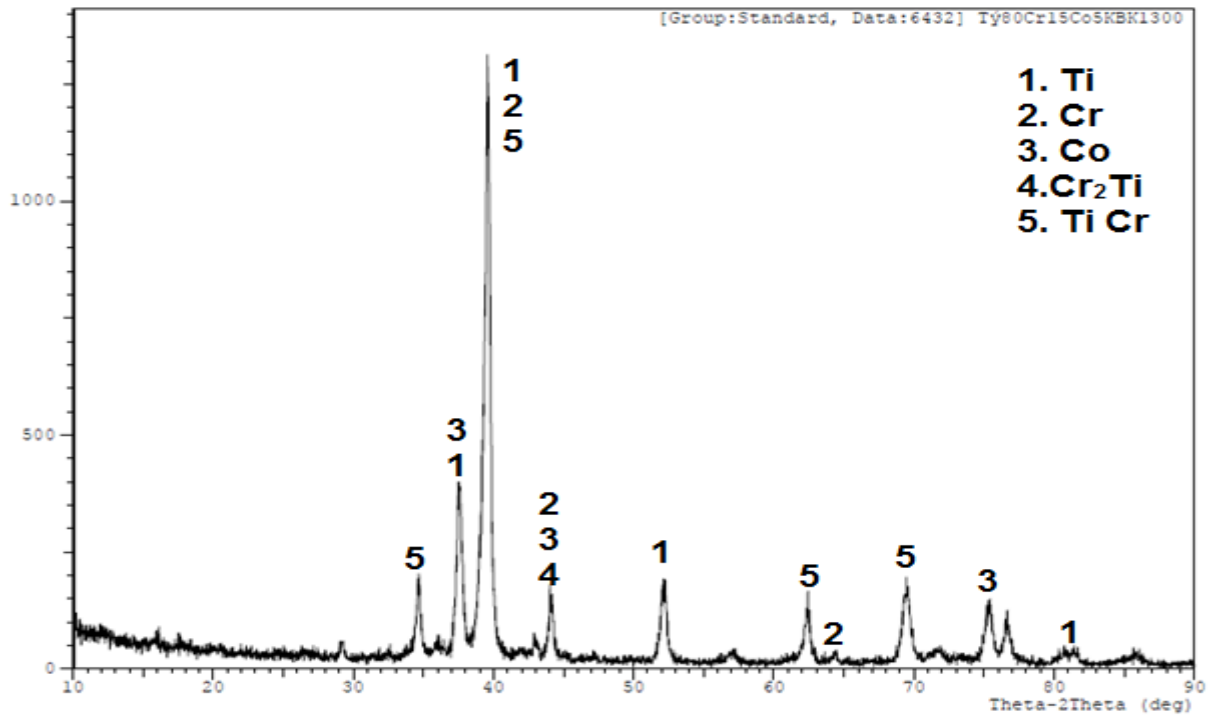


Figure 9. The XRD analysis results of Ti-10Cr-3,33Co-3,33egg shelter composite at 1300°C

3. Conclusions

Composites produced by electroless nickel plating technique show better mechanical properties besides sintering advantage. It is less porous than composites produced without coating. It is expected to increase corrosion resistance as it is less porous compared to composites produced without coating.

The results obtained from Ti-10Cr-3,33Co-3,33egg shelter composite samples are given below. It was aimed to increase the toughness and decrease the hardness value using eggshell powder in composite production.

- The highest density in composite made from Ti-10Cr-3,33Co-3,33 egg shelter powders sintered at range of 900°C-1300°C temperatures was obtained at 1200°C. The highest density sample was found as 3,95gr/cm³ at 1200°C.
- The highest micro hardness was produced using the powder metallurgy method was found as 197,8HV at 1200°C in Ti-10Cr-3,33Co-3,33 egg shelter composite samples.
- It was also found out the best properties at 1200°C in Ti-10Cr-3,33Co-3,33Egg shelter composite. It will be suitable for cutting or plotting tools used in soil industry.

References

- Abdulrahman Idris, Tijani Hamzat Ibiyeye, Mohammed, Bashir Abubakar Haruna Saidu, Yusuf Hindatu, Mohammed Ndejiko Jibrin, and Mohammed Sulaiman (2014). "From Garbage to Biomaterials: An Overview on Egg Shell Based Hydroxyapatite" Hindawi Publishing Corporation Journal of Materials Volume 2014
- Boonpoke A., Chiarakorn S., Laosiripojana N., Towprayoon S., and Chidthaisong A., (2013). "Synthesis of activated carbon andMCM- 41 from bagasse and rice husk and their carbon dioxide adsorption capacity," Journal of Sustainable Energy&Environment, vol. 2, pp. 77–81.
- Boron, L., (2004). Citrato de cálcio da casca do ovo: biodisponibilidade e uso como suplemento alimentar. UFSC, Florianópolis.
- Luengo M. Martin, Yates M., Ramos M. et al., (2011). "Renewable raw materials for advanced applications," in Proceedings of the World Congress on Sustainable Technologies (WCST'11), pp. 19–22, IEEE.
- Neves, M.A., (1998). Alternativas para valorização da casca de ovo como complemento alimentar e em implantes ósseos. UFSC, Florianópolis.
- Rashidi N. A., Yusup S., Ahmad M.M., Mohamed N.M., and Hameed B. H.,(2012) "Activated carbon from the renewable agricultural residues using single step physical activation: a preliminary analysis," APCBEE Procedia, vol. 3, pp. 84–92,.

- Ling I. H. and Teo D. C. L., (2011) "Lightweight concrete bricks produced from industrial and agricultural solid waste," in Proceedings of the World Congress on Sustainable Technologies (WCST '11), pp. 148–152,.
- Peng G. Y., Fang Y. S., Zhe Z. J., Chen W. Z., and Yu Z. M., (2000) "Preparation of active carbon with high specific surface area from rice husks," Chemical Research in Chinese Universities, vol. 3,.
- Surip S. N., Bonnia N. N., Anuar H., Hassan N. A., and Yusof, N.M., (2012) "Nanofibers from oil palm trunk (OPT): preparation & chemical analysis," in Proceedings of the IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications (ISBELA '12), pp. 809–812, Bandung, Indonesia.
- Taheri-Nassaj, E., Mirhosseini, S.H., "An In Situ WC–Ni Composite Fabricated By The SHS Method", Journal Of Materials Processing Technology, Volume: 142, 422–426, 2003.
- Upadhyaya G.S., Bhaumik S.K., (1998). Sintering Of Submicron WC–10% Co Hard Metals Containing Ni And Fe, Materyal Sciences Engineering-A, Volume:249, 105–106.
- Xu Z., Zhu Y., Liang M., Zhang H., and Liu H., (2011) "Optimization of the preparation conditions for activated carbons from sugarcane bagasse an agricultural waste," in Proceedings of the International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM '11), pp. 555– 559, IEEE,.
- Yönetken A., Bilici Ö.V., Erol A., (2019). Ti-Cr-Cokompozit Malzemelerin Poisson Oranı, Sertliği ve Elastik Modülleri Arasındaki Korelasyon, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, AKÜ FEMÜBİD 19, Özel Sayı 404-409
- Yuhong X., Ki L., Xiaoying Z., Schoenung Julie M., (2008) "A Streamlined Life Cycle Assessment On The Fabrication Of WC-Co Cermets" Journal Of Cleaner Production, Volume:16, 1118-1126,
- Zakaria Z., Buniran S., and Ishak M. I., (2010) "Nanopores activated carbon rice husk," in Proceedings of the International Conference on Enabling Science and Nanotechnology (ESciNano '10), pp. 1–2, Kuala Lumpur, Malaysia, December.



Mechanical & Microstructural Analysis of Armor Steel Welded Joints

Tekin Özdemir¹

¹National Defence University, Turkish Military Academy, Department of Mechanical Engineering, Ankara, 06380 TURKEY

Başvuru/Received: 27/11/2018

Kabul / Accepted: 30/09/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Abstract

One of the main construction materials used in armor vehicles is Mil-A 46100 Armor Steel. The importance of the material arises from its mechanical properties such as hardness and explosive protection capability. MIG (Metal Inert Gas) welding technique is principally based on welding metals via electric arc where the arc is continuous between metals and welding wire. In case welded metals are steel based materials, O₂ and CO₂ are added in protective gases in order to prevent unexpected welding defects. In MIG welding applications, the amount of ferrite in the chemical structure of the armor steel may result in some unexpected affects due to its decreasing characteristic on ductility and toughness. The welding wires used in MIG operations may exhibit different fracture characteristics; as some specimen show ductile fracture characteristics, the rest may show brittle. Charpy Impact Test is one of the effective tests to determine the impact energy and the fracture times of welded metals. In this study, it is aimed to determine the relations between micro-structural results and fracture times of the welded parts of Mil-A 46100 steels via MIG applications.

Key Words

“MIG, Welding, Fracture energy, Brittle, Ductile”

1. Introduction

Armor steels are more keen to be welded compared to any other type of metals. Besides this, thanks to those good mechanical properties, they are preferred in armor vehicle construction. Joining of high strength armour steel plate developed for lighter armour vehicles using both austenitic and ferritic type of electrode/filler wire could show inferior ballistic performance of the welds. Armour grade quenched and tempered (Q & T) steel closely conforming to AISI 4340 is primarily used for construction of military and non-military vehicles, because of their high energy absorbing properties. The ballistic requirement of Q & T steels used for armour application requires high strength, greater notch toughness and high hardness. The effect of heat-input on the heat affected-zone (HAZ) softening in Q & T steel and width of the soft zone and, in turn, its influence on hardness and ballistic performance was investigated by Reddy and Mohandas. (M. Balakrishnan et al., 2013)

Combination of hard facing electrode and softer Austenitic Stainless Steel electrodes, though provided improved ballistic performance, might not satisfy main design criteria such as strength and toughness due to non-homogeneous microstructure of weld metal. In order to satisfy improved ballistic performance as well as other design parameters, it is highly desirable to develop coated electrode which will attribute more homogeneous microstructure in weld metal similar to high strength armour steel plate. (A.K. Pramanick et al., 2016) Also known as armor steel, these materials are generally used as armored combat vehicles. Armored vehicles have large number of joining methods due to their complex structure. Therefore, different welding methods are widely used in joining processes in combat and logistics vehicles. Choosing correct welding method and parameters is crucial in field performance of armored vehicles. (Sarsilmaz et al., 2017) Also some scientists used various techniques to measure hardness and impact energy of welded area and gives especially results of Split-Hopkinson tests. (Falkenreck et al., 2017)

Some scientists evaluated the crystallographic texture, defined as the distribution of orientation of crystals (or grains), to gauge the deformation and microstructural evolution of ARMOX 500T armour plates at elevated strain rates. Using neutron diffraction, the authors examined a number of specimens deformed at room temperature and high strain rates and contrasted these with equivalent samples deformed quasi-statically. Since crystallographic texture can play a part in the armour's ballistic response the authors were able to observe a rate dependent textural development, with the strengthening of the rolling α -fibre. The hot rolling process used in the manufacture of these steels leads to a through thickness texture variation that leads to an asymmetric transitional texture in the strain regime (1–2%) but with increased strain a symmetric texture develops irrespective of the strain rate, albeit with different intensities. (M. Saleh et al., 2018) An investigation on welding high strength armor steels with austenitic filler material using Gas Metal Arc Welding (GMAW) process, armor plates conforming to MIL A 46100 standard were prepared with six different groove angles using 307 Si austenitic stainless steel electrode. Welded test specimens were subjected to tensile testing and microhardness measurements in three zones (fusion zone, heat affected zone and base metal zone) were recorded. Comparing the results obtained from both tensile testing and microhardness measurements, the optimum groove angle to result in the highest mechanical properties is determined. They used MIL A 46100 armour steel, using Gas Metal Arc Welding process and six different groove angles using 307 Si austenitic stainless steel electrode. Welded test specimens were subjected to tensile testing and microhardness measurements. Comparing the results obtained from both tensile testing and microhardness measurements, the optimum groove angle to result in the highest mechanical properties is as 48° (Kurt et al., 2016) In a welding application, based on the results obtained in a previous study by using E11018M, a ferritic filler exhibiting similar chemical and mechanical properties was selected. The final selection relied on ER100S-1 wire based on commercial availability and the fact that ESAB trademarked filler is the only one that meets the requirements of the MIL-E-23765/2 standard. (Robledo et al., 2011) MIL-STD-1185 is also important for our study - Welding High Hardness Armor designates standards for MIL-A 46100 armour steel. (Military Specification Armor Plate, 1983)

In an MSc thesis about MIL-A 46100 armour steel, the mechanical properties are measured as hardness 510 HV, and toughness 43 Joules (J). Then some heat treatment applications are conducted on the steel. As the tempering heat rises, they saw that the hardness decreases. Also they saw the martensitic phases in all their heat treatment levels in the microstructures. After welding operation, they noticed that there are still some martensitic zones in the welded area despite the high heat transfer during the welding operation. Thereafter the welded and heat-treated parts are put under an impact test. As a result, they found that the heat-treated specimen has a toughness of 60 J, whereas the original specimen 46 J. (Merzali, 2013) The impact toughness and elongation rate of MI 307 Si welding wire is 80 J and %40 according to a proceeding. (Çelik Ç., XI. Welding Congress) The most known and most widely used steel armour plates are ARMOX steels by Swedish company SSAB Oxelosund. The steels have lean chemical composition which simplifies welding. Carbon equivalent (1) of these steel is relative low (0.6-0.7), therefore they have very good weldability. $CEV = C + Mn/6 + (V + Mo + Cr)/5 + (Cu + Ni)/15$ [%]. However, their welding is problematic due to heat influence during welding process. Armox steels have high strength, hardness and good toughness. The steels acquire these specific properties by application of thermo-mechanical treatment (TMT) and therefore the producer recommends do not exceed the temperature circa 200°C during their secondary processing as is welding. The reason of degradation of mechanical properties during ARMOX 500 steel welding are changes in microstructure. The original (un-affected) microstructure consists of very fine-grained heterogeneous sorbitic structure obtained as a result of thermo – mechanical treatment. This structure provides high strength, toughness and hardness required from this kind of steels. (Barényi et al., 2012)

In an Impact test, first the energy amount to break the specimen is designated as the impact strength. In those applications, the Pendulum is the best solution. The pendulum has a G mass and h height at the beginning having a potential energy of Gxh . When the Pendulum is freed at that height, it moves and breaks the specimen, then goes back to the h_1 position, which is near to the initial position. Thus, the potential energy left on the pendulum is Gxh_1 . The difference between the potential energies when the pendulum first touches the specimen, and after the break is the energy amount enough to break that specimen. In other words, this energy

difference is described as the Impact Resistance. In a study, Ramor 500 armor steels which are used in armored combat vehicles were welded by MIG (Metal inert gas) welding method. 307 Si MIG welding wire was used as an additional metal which is proposed for MIG welding of armor steels. The effect of welding groove type on metallurgical and mechanical properties was investigated in experimental studies. Three different conditions, which were included Y, X and Z were selected as welding groove. (Kara et al., 2016)

Ramor 500 armor steels which are used in armored combat vehicles were welded by MIG (Metal inert gas) welding method. 307 Si MIG welding wire was used as an additional metal which is proposed for MIG welding of armor steels. The effect of welding groove type on metallurgical and mechanical properties was investigated in experimental studies. Three different conditions, which were included Y, X and Z were selected as welding groove. The welding grooves were shaped by using the milling method. The microstructures of the weld regions were examined by optical microscope, SEM, EDS and XRD. Mechanical properties of the specimens were determined by microhardness tests and impact tests. As a result, the effect of design of welding groove on welding strength was identified for joints of armor steels. (Thora et al., 2017) In a study it is shown that the hardness in the heat affected material is not constant along the path. This hardness is considered for the heat treatment. Maximum hardness is located where the maximum deformation will occur on welded joints under dynamic loads due to high geometrical stress concentration. The aim of heat treatment is to obtain tensile specimens with mechanical properties close to those of a HAZ obtained by welding and not to recreate there a local complex thermal cycle induced by the welding process. These specimens are used to characterize the HAZ material dynamic behavior. (J. Carrier et al., 2017)

The influence of different welding speeds and rotary speeds on the formation and mechanical properties of friction stir weld joints of armor grade aluminum alloy were investigated in a study. The weld joints were characterized by bend tests, micro-hardness tests, tensile tests, optical and scanning electron microscopies. Mechanical properties (i.e., micro-hardness, ultimate tensile strength and elongation to fracture) increased with the increase in rotary speed or decrease in welding speed. The effect of welding speed on micro-hardness of heat affected zones was more profound than the rotary speeds. The welding speeds and rotary speeds influenced the mechanical properties and their effects on various mechanical properties of the friction stir welded joints can be predicted with the help of regression models. (C. Sharma et al., 2017) It is found in a test that, the best combination of heat treatment together with metal chemical composition and cleanliness in steel imparts acicular martensite microstructure which is responsible for superior dynamic fracture toughness compared to the welded joints. Also, the dynamic fracture toughness of the manually welded joint is higher than that of the automatically welded joint owing to the presence of a circular ferrite microstructure in the weld metal region. (G. Magudeeswaran et al., 2010)

R. Lezcano et al. (2009) proves that; when making welding joints, small discontinuities, voids and other defects cannot be absolutely avoided and the heterogeneity of the own joint along with the presence of residual stresses may be taken into account in order to prevent failures and to assure the integrity of the whole component or structure. One of the key factors for understanding the fracture behaviour of any welded structure containing cracks is the heterogeneity of the joint. In an ideal weld, where a crack is contained within the weld metal and can grow parallel to the weld metal-base metal interface, assuming that the effect of the heat affected zone is negligible. For the welded structures are subjected to large plastic deformation, due to the interaction between weld strength mismatch and weld geometrical feature, a more complicated local stress status and plastic strain concentration can be observed in the welded zones, which make ductile cracks tend to occur primarily at and near the welds, affecting the final failure mode and performance of welded structures. (Hao Wang et al., 2018) Kang et al. (2015) investigated the ductile fracture behaviours of welded joints and small welded connections through experimental and numerical analyses, proposing the ductile fracture models and related parameters of different welded zones.

According to the study conducted by Hongchao Guo et al. (2018) the welded joint of steel structure is prone to occur fatigue fracture under dynamic loads. In this paper, an experimental study on the fatigue performance of base material, butt weld, and cross fillet weld of high-strength steels were investigated. The S-N curve was fitted, and the corresponding fatigue life was predicted. Results show that the base material of high-strength steel possesses high fatigue resistance. Also, a quantitative analysis on fatigue fracture was conducted on the basis of fatigue damage theory, and the fatigue crack propagation law was disclosed on the basis of fracture morphology. The crack propagation law before instant fracture is consistent with damage development, and the fatigue striation width increases gradually with damage development. The fast crack propagation stage accounts for a small proportion in the fatigue life, thereby indicating that this stage is insufficiently developed. The fracture toughness of two types 316LN welded joints in different orientations at 300 K and 623 K in air was investigated. The tests were conducted using the single specimen method, where J-R curves and fracture toughness values were obtained. Microstructure of the specimens were characterized before and after the test. Results show that 2GT welded joint exhibits higher toughness as compared to 5GT welded joint, and orientation has slight effect on the fracture toughness. Moreover, the fracture toughness drops remarkably with the increase of temperature. Wenhua Gao et al. (2017) Yonghe Yang et al. suggest that; the microstructures, mechanical properties and fracture toughness of the materials in different locations of the welded joint of the X80 pipeline steel were studied at room temperature. Elastic-plastic fracture toughness testing of crack tip opening displacement (CTOD) and J-integral of the welding materials and base material were conducted. A new non-contact double-clip gauge measuring system was developed and used in the fracture toughness tests. It was observed the fusion zone (FZ) was the fracture risk zone of the X80 steel weldment; and the occurrence of hard-brittle martensite-austenite (M-A) constituents was a significant factor because of welding hardening and embrittlement.

2. Material Specifications and Technical Data

2.1. MIL-A 46100 Armor Steel Mechanical Properties

The Chemical Compound and Mechanical Properties of MIL-A 46100 Steel are shown on the Table1-2. As seen on the tables the armour steel has dominantly Carbon in the chemical compound, and the Charpy Impact energy level of 28 J.

Table1. Chemical Compound of MIL-A 46100 Steel (Robledo at el., 2011)

Element	Wt. %	Element	Wt. %
C	0.284	Sb	0.001
V	0.007	Ti	0.031
Al	0.020	P	0.010
Sn	0.008	S	0.002
Cu	0.177	Pb	0.005
Cr	0.300	Ni	0.192
Si	0.534	Mo	0.243
Mn	0.899	Fe	Balance

Table 2. Mechanical properties of MIL-A-46100 steel plates (Robledo at el., 2011)

Property [Units]	Value
Tensile Strength [MPa]	1690
Elongation [%]	25
Charpy V-Notch @ -20 °C [J]	28
Hardness [Hv]	525

2.2. Weld Groove Types Used in the Experiments

V and Double V (X) grooves are opened with a 30° angle on each plate before welding operation in order to make a comparison between the weldings. The welding has been performed along with X direction.

2.3. Welding Wire Types & Mechanical Properties

The following two kinds of welding wires are chosen because they have enough capability for armour and hardfacing applications as seen on Tables 3-4. MI 307 Si wire is an Austenitic stainless steel wire electrode for GMA (MIG/MAG) welding of dissimilar steels, difficult to weld steels, armour plates, high manganese steels, rails, crossovers. Weld metal has a high degree of corrosion resistance and resistant to operating temperatures up to 300°C and non-scarring up to 850°C.

Table 3. Chemical Compound of MI 307 Si wire

Element	C	Si	Mn	Cr	Ni
Wt. %	< 0.20	0.65 - 1.00	4.50 - 7.50	17.00 - 20.00	7.00 - 10.00

FCH 330 wire is gas shielded flux cored wire which is developed for hardfacing of parts subjected to metal-to-metal friction (abrasion) and medium degree impacts. Due to its very tough and crack resistant weld metal, it is also used for buffer layer applications. As the weld metal has medium degree hardness it can be machined by chip forming and flame or inductive hardening is possible. Interpass temperature should not exceed 250°C during welding.

Table 4. Chemical Compound of FCH 330 wire

Element	C	Si	Mn	Cr	Fe
Wt. %	0.14	0.40	1.10	1.25	Remain

3. Test Preparation And Methodology

3.1. Material & Sample Preparation

The MIL-A 46100 plates are welded using MI 307 Si wire and FCH 330 wire respectively via XMS 44 Welding machine. The wire feeding speed is designated as 8 m/min. The welding current was approx. 220 amperes under 30 volts of voltage. The specimens are machined via modern 3 and 5-axis milling machines. The welded armour plates were sliced into 10 mm parts in order to prepare Charpy test specimen as seen on pictures 1-2.



Pic.1. Welded part with X groove



Pic.2. Charpy Test Specimen

3.2. Weld Groove Types Used in the Experiments

V and Double V (X) grooves are opened with a 30° angle as seen on Fig.1, on each plate before welding operation in order to make a comparison between the weldings. The welding was performed along with X direction as seen on Fig.2.

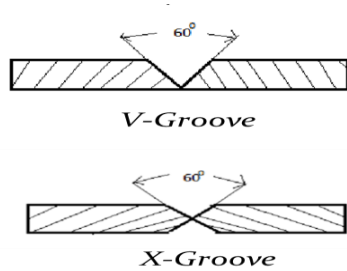


Fig.1. V and X grooves

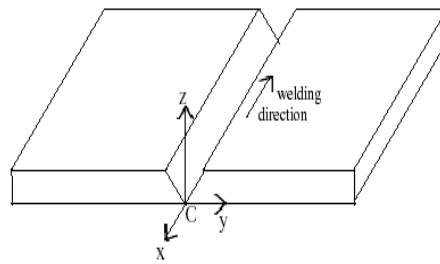


Fig.2. Welding direction

After preparation of specimen, the Charpy Impact Energy tests were conducted on INSTRON CEAST 9350 and INSTRON Pendulum devices seen on Pic.3. Impact tests were conducted on the specimen with X and V grooves extracted from welded parts at STP. The standard for welded parts for impact test is described on BS EN 875 test standards document. Each energy value obtained is the arithmetic average of three tests. Following tests, the surface morphology was inspected via JEOL SEM device seen on Pic.4. According to the test standards document, the notch depth is designated as 1 mm at the center of the sample, while the sample having the dimensions of 10x10x55 mm.



Pic.3. Charpy impact & pendulum test devices



Pic.4. JEOL SEM device

4. Scientific Background

Fracture toughness criteria, Charpy impact toughness (K_{IC}) for each sample is used to validate crack propagation and fracture type. Charpy impact toughness values are calculated from charpy impact energy by using J integration of the crack length Δa expressed as below. (Kraft, J. M.,1964) (Ozdemir T. At et al., 2015)

Charpy impact energy and fracture toughness are given;

$$J = C. \Delta a^p \tag{1}$$

Here C is compliance and defined by geometry of charpy specimen (a_0, B_0, w) as follows,

$$C = \left(\frac{2}{p}\right)^p \cdot \frac{\eta(a_0)}{B_0 \cdot (w-a_0)^{p+1}} \cdot W_t^p \cdot W_m^{1-p} \quad (2)$$

Where W_t is entire fracture energy, W_m is state energy achieved at maximum force,

p and $\eta(a)$ are parameters defined by

$$p = \frac{3}{4} \cdot \left(1 + \frac{W_m}{W_t}\right)^{-1} \quad (3)$$

$$\eta(a) = 13,81 \cdot (a/w) - 25,12 \cdot (a/w)^2 \quad (4)$$

$\frac{W_m}{W_t} = n$ Here n is strain-hardening coefficient approximately equal to ductility (A_f) according to Kraft et al.

$$J = \left(\frac{2}{p}\right)^p \cdot \frac{\eta(a_0)}{B_0 \cdot (w-a_0)^{p+1}} \cdot W_t \cdot A_f^{1-p} \cdot \Delta a^p \quad (5)$$

Here $W_t = KV$ and, KV is impact energy.

For plane strain conditions fracture toughness can be defined as follows;

$$K_{IC} = \left(J \cdot \frac{E}{(1-\nu^2)}\right)^{0.5} \quad (6)$$

This equation is suitable for our Charpy Impact Energy tests.

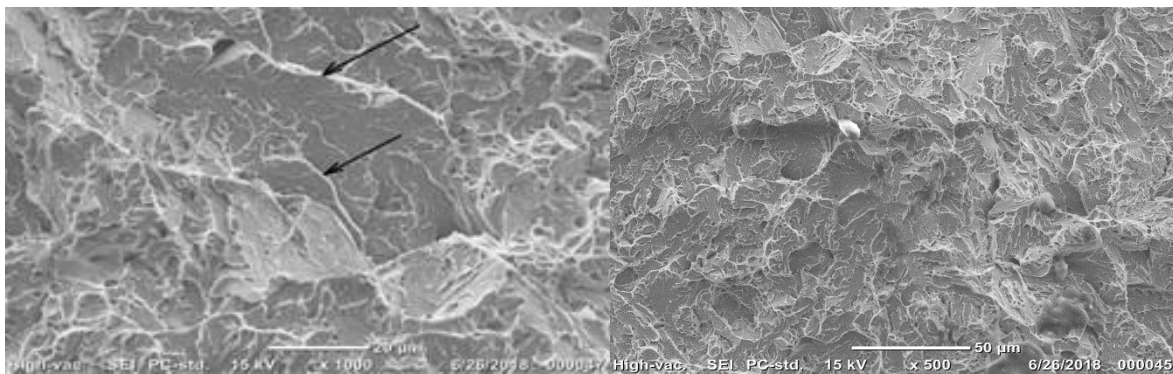
5. Results

5.1. Welding Results

In the overall inspection of all fractured surfaces; the similarity in fractured surface morphologies of all specimen shows that the welding parameters are applied properly for the process. Welding wires both give satisfactory results, but 307 Si wire provides with better mechanical properties compared to FCH 330 wire. In welding application of MIL-A 46100 Armour steel; groove angle, wire feeding speed, voltage and currency are all important parameters for effective welding operations. Groove angle is effective for MIG welding as 60° .

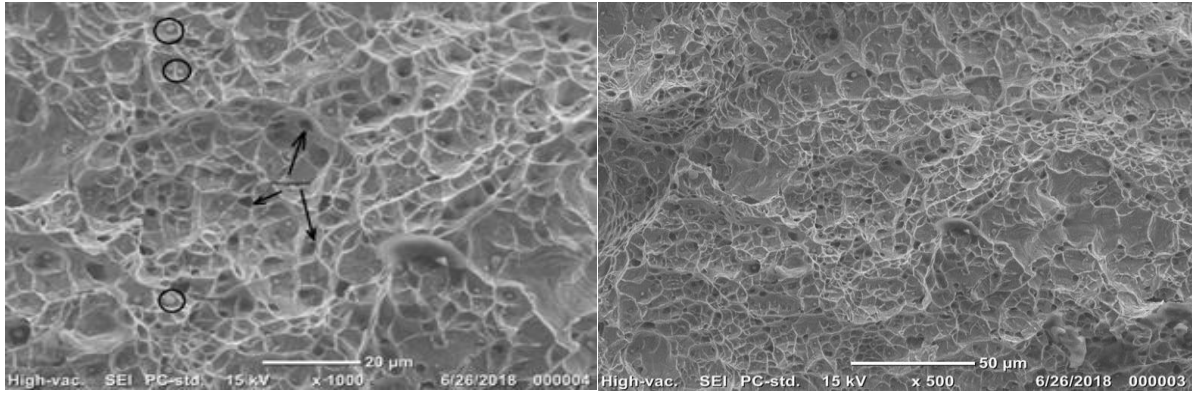
5.2. Microstructural Analysis

No critical defects are seen on Picture 3.a,b showing the microstructure of welded parts. Fibrous scenes seen on the SEM photos mean that the fracture type on the inspected areas are like ductile cleavage, depending on the weld wires' mechanical properties. According to the micro-granular (grain-sizes in 500x and 1000x photos) morphology; the injected heat, welding speed, wire feeding speed, weld groove and the mechanical properties of welding wires have dominant effect on the quality of the weldings. Another finding pertaining to the brittle cleavage of sample welded with MI307 Si is that; there are microporous areas on the inspected zone. The porous scenes on the fracture are dominant and they are very small structures, which means that the fracture happens very quickly.



Pic.5. a,b Microstructure of welded samples with FCH 330 wire

The fracture seems to happen like cleavage type fracture because; fracture first initiates from the grains, then accelerates along a plane, damage in one plane triggers the others along an axis and the damage widens straightly. There is an example of this kind of cleavage seen on the pic.6 a,b below.



Pic.6. a,b Microstructure of welded samples with MI307 Si wire

5.3. Impact Energy

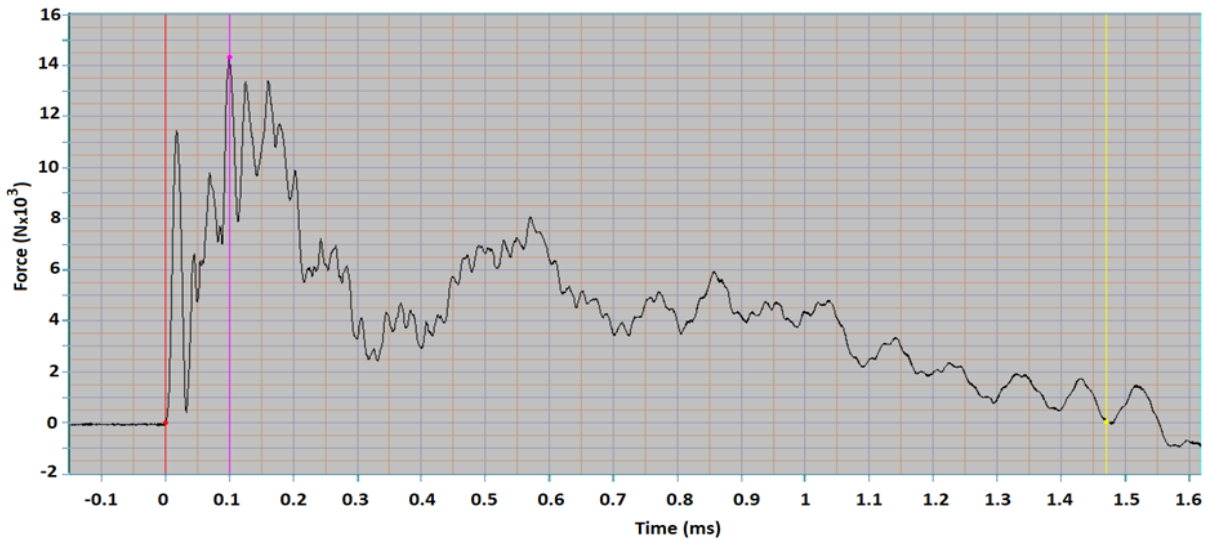
As seen on the Table 5 below, HAZ of the weldings has satisfactory impact energy levels, V grooved specimens show better resistance to impact energy compared to the X groove. Compared to the other scientific studies mentioned in the introduction phase of this study, the results are similar and in accordance with each other.

Table 5. Charpy Pendulum & Impact Energy of Welded Parts

# Sample	Weld Filler	Groove	Charpy Pendulum Energy Absorbed (J)	Charpy Impact Energy Absorbed (J)
I	MI 307 Si	X	50.22	29.53
II	MI 307 Si	V	87.12	94.26
III	FCH 330	X	18.69	29.94
IV	FCH 330	V	46.60	41.37

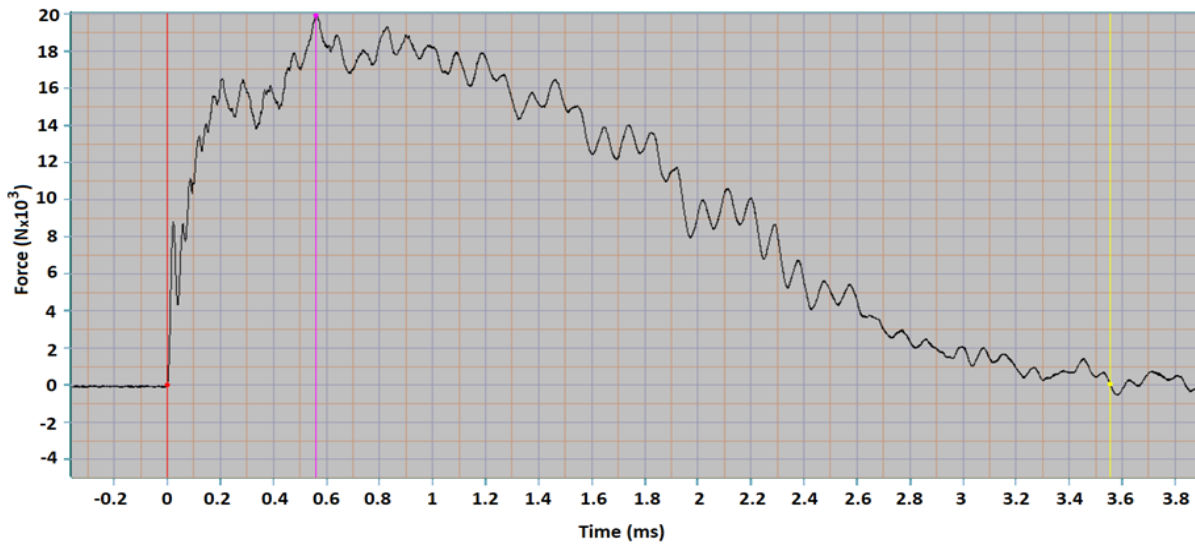
5.4. Fracture mechanical analysis

The following data is obtained directly from Instron CEAST 9350 device.



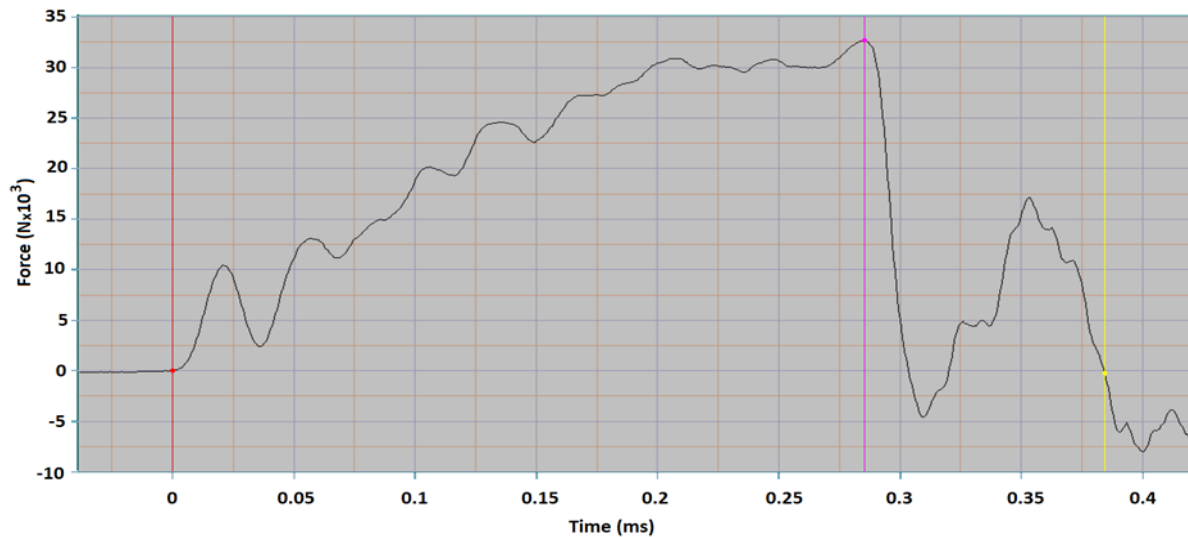
Graph 1. Force-time fracture graph of sample I

On graph 1, it is explicitly seen that, the fracture happens very quickly at 0.1 millisecond (ms) via 14 kN force. The groove type of sample I is X, which is not preferable compared to V groove and the fracture is brittle compared to the other samples. The fracture curve exhibits a deceleration until the time 1.5 ms where the load becomes 0 kN. This means that the cleavage started and ended in a very small time interval, which is a basic behaviour of brittle fracture of metals. Also, we have to mention that, the X grooved sample has very little impact absorb capacity compared to the V grooved sample. This sample's impact resistance is smaller than sample II as seen on Table 5.



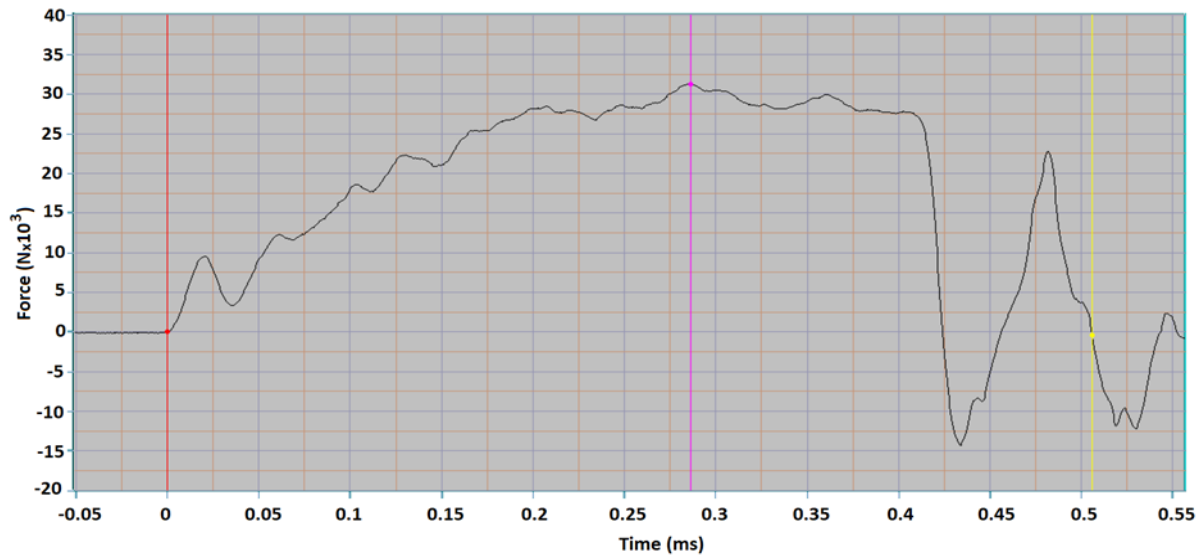
Graph 2. Force-Time fracture graph of sample II

On graph 2, it is seen that, the fracture happens quickly at 0.58 milisecond (ms) via 20 kN force, but this cleavage lasts longer. The groove type of sample II is V, which is more preferable than X groove in armor weldings. The fracture is again brittle compared to the samples III, IV. The fracture curve exhibits more moderate deceleration than sample I, until the time 3.5 ms where the load becomes 0 kN. This means that the cleavage started and ended in a very small time interval, which is also a basic behaviour of brittle fracture of metals. Sample II has more impact resistance than sample I, owing to V groove type and weld filler material's carbon ratio, as seen on Tables 3,5.



Graph 3. Force-Time fracture graph of sample III

On graph 3, the scheme of fracture changes completely shifting from brittle fracture to ductile. The fracture happens quickly at 0,28 milisecond (ms) via 30 kN force. The groove type of sample III is X, which is less preferable than V groove in armor weldings. The fracture is ductile compared to the samples I, II. The fracture curve exhibits a deliberate deceleration until the time 0.38 ms where the load becomes 0 kN. This means that the cleavage started and ended in a very small time interval, but because of the X groove which has less impact energy absorb capacity than V groove, the fracture starts in a ductile form but results in a brittle form.



Graph 4. Force-Time fracture graph of sample IV

On graph 4, the scheme of fracture is completely ductile. The fracture happens quickly at 0,28 milisecond (ms) via 30 kN force. The groove type of sample IV is V, which is more preferable than X groove in armor weldings. The fracture is ductile compared to the samples I, II and III. The fracture curve exhibits a resistance to impact energy between 0.28 to 0.43 ms. After 0.45 ms, the impact energy beats the resistance of the sample and there happens a deliberate deceleration at 0.45 ms where the load becomes 0 kN. This means that the cleavage started and ended in a very small time interval, the fracture results in ductile form in general.

6. Conclusions

Welding parameters used in the process are good enough to meet the ballistic requirements for Mil-A 46100 armor steel in the operational area. Welding wires both FCH 330 and MI 307 Si give satisfactory impact energy results, but 307 Si wire provides with better mechanical properties to the welding, due to having more carbon ratio in the compound. HAZ of the conducted weldings have satisfactory impact energy absorption levels compared to the mechanical properties shown on Table 2. V grooved samples exhibit better impact resistance compared to the X grooved ones, since the HAZ of the former has better Welding quality compared to the later. Groove angle, wire feeding speed, voltage and current are important parameters for effective welding operations in Welding applications of armour steels. Groove angle effective for MIG Welding in armor steel Mil-A 46100 is found as 60°, via the comparison of the results of the other welding results conducted by other groove angles. There are porous areas on the inspected fracture surfaces, which means that the fracture occurs very quickly owing to the weld wires' chemical composition, and depending on the impact absorption capacity of the welded area. Fibrous scenes are seen on the SEM photos especially on samples welded using FCH 330 wire, meaning that the fracture type is less brittle than the ones welded with MI307 Si wire. In terms of fracture times of the samples; fractures in the armour steel welded joints may exhibit brittle or ductile characteristics depending on the groove types, carbon ratio in the compounds, and weld filler used in the welding operations. In the overall scheme of Charpy tests conducted on the samples chosen, the cleavage in the welded joints are very quick and mostly brittle owing to the carbon ratio in the weld wires' compounds.

References

- Balakrishnan M., Balasubramanian V., Reddy G. M. (2013), Effect of hardfaced interlayer thickness on ballistic performance of armour steel welds, *Materials and Design*, 44 (2013) 59–68.
- Barényi I., Híreš O., Lipták P. (2011), International, Degradation Of Mechanical Properties Of Armoured Steels After Its Welding, Conference Of Scientific Paper AFASES 2011, Brasov, 26-28 May 2011.
- Carrier J., Markiewicz H., Lebaillif, Leconte, Naceur, (2017) Influence of the heat affected zone on the dynamic behavior of a welded joint of armoured steel, *International Journal of Impact Engineering* 104 (2017) 154-163
- Çelik Ç., IX. Kaynak kongresi Ulusal kongre ve sergisi bildiriler kitabı zırh çeliklerin kaynağında kaynak ağzı geometrisi ve ilave tel optimizasyonu, (Pg.89-94).
- Gao W., Chen K., Guo X., Zhang L. (2017) Fracture toughness of type 316LN stainless steel welded joints, *Materials Science & Engineering A* 685 (2017) 107–114.
- Guo H., Wan J., Liu Y., Hao J., Experimental study on fatigue performance of high strength steel welded joints, *Thin-Walled Structures* 131 (2018) 45–54.

- Kang L., Ge H., Kato T., Experimental and ductile fracture model study of single Groove welded joints under monotonic loading, *Engineering Structures* 85 (2015) 36–51.
- Kara S., Korkut M.(2012), Zırhlı Muharebe Araçlarında Kullanılan Zırh Plakalarında Kaynak Sonrası Isıl İşlemin Birleşim Mukavemetine Etkisinin Araştırılması, *The Journal of Defense Sciences*, November 2012, Volume 11, Issue 2, 159-171, ISSN: 1303-6831.
- Kelami Ş.M., Emre M.C., (2013) Zırh çeliklerinde kaynak sonrası ısı tesiri altında kalan bölgenin özelliklerinin ısı işlem ile iyileştirilmesi, MSc Thesis, Istanbul Technical University Science and Technology Institute, June 2013.
- Kraft, J. M., Correlation of plane strain toughness with strain-hardening characteristics of a low, medium, and a high strength steel. *Applied Materials Research* 3, (1964).
- Kurt S., Evci C., Işık H., Işık M.S.(2016) Farklı Kaynak Ağız Açılarının 307Si Elektroduyla Kaynak Edilmiş Mil-A 46100 Zırh Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 31(ÖS 1), pp. SI 155-SI 162.
- Lezcano R., Rodríguez C., Peñuelas I., Betegón C., Belzunce F.J., (2009), Effect of mechanical mismatching on the ductile-to-brittle transition curve of welded joints, *Engineering Failure Analysis* 16 (2009) 2576–2585.
- Magudeeswaran G., Balasubramanian V., Reddy G. M. (2014) Effect of welding processes and consumables on fatigue crack growth behaviour of armour grade quenched and tempered steel joints, *Defence Technology*, 10 (2014) 47-59.
- Ozdemir T., Eruslu O.S., Finite element modelling of crackable connecting rods at fracture splitting process, (2015) *Mechanika* Volume 21(2): 85–90.
- Pramanick A.K., Das H., Reddy G.M., Ghosh M., Das G., Nandye S., Pal T.K. (2016) Development and design of microstructure based coated electrode for ballistic performance of shielded metal arc welded armour steel joints, *Materials and Design*, 103 (2016) 52–62.
- Robledo D.M., Gómez J.S., Barrada J.G. (2011) *Dyna*, ano 78, Development Of A Welding Procedure For Mil A 46100 Armor Steel Joints Using Gas Metal Arc Welding, *Medellín Agust 2011*, Nro. 168, pp. 65-71, ISSN 0012-7353.
- Saleh M., Kariem M., Luzin V., Topplerf K., Li H., Ruan D. (2018) High strain rate deformation of ARMOX 500T and effects on texture development using neutron diffraction techniques and SHPB testing, *Materials Science & Engineering A*, 709 (2018) 30–39.
- Sarsilmaz F., Kirik I., Batı S.(2017), Microstructure and mechanical properties of armor 500/AISI2205 steel joint by friction welding, *Journal of Manufacturing Processes*, 28 (2017) 131–136.
- Sharma C., Upadhyay V., Dwivedi D. K., Kumar P., Mechanical properties of friction stir welded armor grade Al–Zn–Mg alloy joints, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 27(2017) 493–506.
- Thora E., Falkenreck M.K., Böllinghaus T.(2017), Dynamic compressive behaviour of weld joints, *Materials Science & Engineering A*, 702 (2017) 322–330.
- US Patent, Military Specification Armor Plate, Steel, Wrought, High-Hardness MIL-A-461OOD(MR), 16 May 1988, Superseding, 13 June 1983.
- Wang H., S. Xu, Wang Y., Li A., Effect of pitting degradation on ductile fracture initiation of steel butt-welded joints, *Journal of Constructional Steel Research* 148 (2018) 436–449.
- Yang Y., Shi L., Xu Z., Lu H., Chen X., Wang X., Fracture toughness of the materials in welded joint of X80 pipeline steel, *Engineering Fracture Mechanics* 148 (2015) 337–349.



Göz Hareketlerine Dayalı Beyin Bilgisayar Arayüzü Tasarımı

Design of Brain Computer Interface Based on Eye Movements

Engin Koç¹, Oğuz Bayat¹, Dilek Göksel Duru^{*2}, Adil Deniz Duru³

¹Altınbaş Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilişim Teknolojileri Bölümü, 34217, İstanbul, TÜRKİYE

²İstanbul Arel Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 34537, İstanbul, TÜRKİYE

³Marmara Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Antrenörlük Eğitimi Bölümü, 34815, İstanbul, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 18/04/2019

Kabul / Accepted: 17/11/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Modern teknoloji ile birlikte insanların göz hareketlerini inceleyerek uyaranlara karşı vermiş oldukları tepkiler takip edilebilir hale gelmiştir. Bu takip yöntemlerinden biri de Göz İzleme (Eye-Tracking) tekniğidir. Bu teknikteki gelişmeler sayesinde araştırmacılar, sağlık, savaş sanayi, sivil havacılık, web tasarımı, dijital medya vb. birçok alanda hayatı daha kolay hale getirilebilecek sistemler hakkında çalışmalar yapabilmektedir. Bu çalışma kapsamında, göz izleme teknolojisinin temel özelliklerinden faydalanılarak beyin bilgisayar arayüzü (BBA) uygulaması geliştirilmiştir. Katılımcıların göz sabitleme bilgisi, tarafımızca hazırlanan deneysel paradigma yazılımları bünyesinde göz-izleme cihazı ile ölçülerek, kişilerden verilen ödevleri gerçekleştirmeleri istenmiştir. Bu kapsamda iki farklı uyaran yazılımı üretilmiştir. Birinci yazılımda, kişilerin ekranda çeşitli bölgelerde görülen butonlara odaklanarak, gözlerinin sabitlenmesi ile butonlara basmaları sağlanmıştır. İkinci yazılımda ise, katılımcının harflere odaklanması istenerek, kelimeler ve cümleleri yazdırmayı sağlayan sanal bir klavye uygulaması geliştirilmiştir. Ayrıca göz fiksasyonları ısı haritası ile görselleştirilmiştir. Tüm aşamalarda kullanılan yazılım ve analiz tarafımızca geliştirilmiştir. Sonuç olarak, hareket etmeden göz hareketleri ile bildirim yapmayı sağlayan hibrid bir sistem geliştirilmiştir. Göz hareketlerine dayalı önerilen BBA sistemi test edilmiş ve yüksek komut/dakika sonuçlarına ulaşılmıştır. Deneysel bulgular önerilen hibrid BBA'nın güçlü ve öne çıkacak bir teknoloji olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler

“Göz hareketlerine dayalı beyin bilgisayar arayüz tasarımı, İnsan-Bilgisayar Etkileşimi, göz izleme, sanal klavye”

Abstract

With the help of modern technology, people's reactions to stimuli by examining the eye movements have become traceable. One of these measurement methods is the Eye Tracking technique. The technical advancements of this technique enable researchers to carry out studies in the fields of health, war industry, civil aviation, web design, digital media etc. that can enhance to improve the quality of the systems that can make life easier. In the concept of this study, a brain computer interface (BCI) is developed by using the principal properties of the eye tracking technology. Eye fixation information of the subjects were measured by using the in-house developed experimental paradigm software with the eye tracker while they were performing the required tasks. Two different experimental paradigm software were implemented. In the former one, subjects were asked to fixate to the buttons that appeared on the screen and they were clicked when the subjects fixated on those buttons. In the latter one, a virtual keyboard was implemented where the subjects were asked to fixate on the characters in order to write words or sentences. Additionally, eye fixations were plotted with the use of heat maps. All of the methods and tools were developed by our team. As a result, a hybrid BCI has been produced using the eye movements of subjects without performing a movement. The developed software tools were applied and high values of instruction per minute was obtained. Experimental results showed that the proposed methodology can be a pioneering technology.

Key Words

“Brain computer interface design based on eye movements, Human-Computer Interaction, eye tracking, virtual keyboard”

1. Giriş

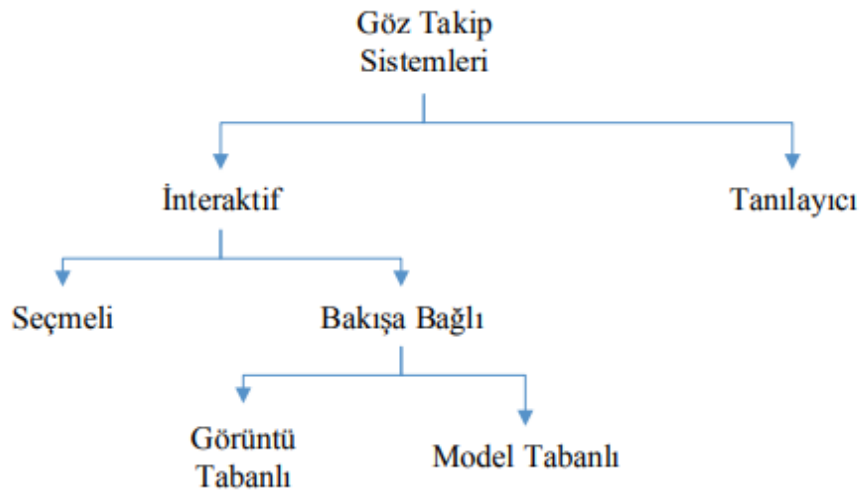
İnsan beyin arayüzü, kullanıcının algısındaki değişiklikleri esas alan insan makine etkileşimi için yeni enformasyon kanalları sunmaktadır. Beyin aktivitesine dayalı klasik bir beyin bilgisayar arayüzü sistemi, kullanıcılarına iletişim kurma yetisini sağlamak ve periferik sinirler ve kaslara ait normal beyin sinyallerine dayanmayan kontrol kanalları sunmaktadır (Wolpaw et al., 2002). Böyle bir sistemin temel amacı paralize kişilere iletişim imkanı oluşturmak, yarı felçli durumda ise tekerlekli sandalye kontrolü gibi olanaklar sağlamak olmuştur (Galán et al., 2008). Periferik sinir sistemi yanı sıra, kullanıcıların etkileşim için daha efektif bir bilgi kanalı oluşturulması adına etkin alternatif fizyolojik parametre arayışı sonucu göz hareketleri ve takibi önem kazanmıştır. Göz hareketlerinin kontrol edilebildiği göz takip sistemlerinin umut verici olmasının bir diğer nedeni de, haberleşmede erişilebilen bit değerinin, ikili komutlarla sınırlı olmayışıdır. Arama ve seçim eylemleri için gözün çıktı olarak kullanım fikri ile insan makine etkileşiminde göz hareketleri çalışmaları karşılık bulmaya başlamış (Bolt, 1982) ve literatürde kullanıcı bakışlarına odaklanan ve arama görevlerini inceleyen çalışmalar yaygınlaşmıştır (Jacob, 1993; Hutchinson, 1993; Engell-Nielsen et al., 2003; Murata, 2006; Nilsson et al., 2007).

Göz takibi temelli etkileşimler bazı kısıtlar etkin olmasına rağmen teknik sistemler ile etkileşim için rahat ve doğal bir araçtır. İnsan göz hareketleri temelde kişinin dikkatinin zaman içerisinde değişiminin göstergesidir (Kahneman, 1973). İnsan bilgisayar etkileşimi için bu fare imleci (kürsör) ve görsel odağın işlevsel olarak birbirinin yerine geçmesi anlamındadır. Göz hareketlerini temel alan sistemlerin tasarımında kasıtlı olmayan odaklanmaların ve belirli bir ilgi alanında bakışların kaldığı aralıklı süreler dikkate alınmaktadır. Bu parametreler genellikle görsel tarama ve bir cismin aranması ve kişiler bir zihinsel aktiviteye angaje olduklarında ortaya çıkmaktadır (Yarbus, 1967).

Fare imlecinin göz hareketleri ile yer değiştirmesinin sağlanmasından daha zorlu olan görev, seçim belirten kürsöre tıklama operasyonudur. Günümüzde pek çok çözüm geçirilen süreye (dwell time) bağlı önerilmiştir. Bu yolla, kullanıcının ön tanımlı bir zaman diliminde, aktive edeceği cisme/objeye odaklanması gerekmektedir. Bu yöntemde geçirilen sürenin optimizasyonu problemi önem taşımaktadır. Çok kısa olduğunda istemsiz olarak komut oluşmakta ve hataya sebep olabilmekte, çok uzun tutulduğu zaman ise deneyimli kullanıcıların demotive olması ve ilgiyi kaybetmeleri sözkonusu olabilmektedir. Özellikle zaman içinde değişen uyarılar ile oluşturulan karmaşık senaryolar esnasında geçirilen sürenin tanımlanması mümkün olamamaktadır (Zander & Gärtner, 2011).

Günümüzde göz takip teknolojilerinin gelişimi ile gözün hareketlerinin izlenmesi mümkün olmakta ve elde edilen veriler dönüştürülerek bilgisayar etkileşiminde kullanılabilir. Göz hareketlerinin veriye dönüştürülebilmesi için elde edilen göz hareketlerinin işlenmesi gerekmektedir. Gözün sürekli olarak gerçekleştirdiği anlık hızlı geçişler olan “sıçrama (saccade)” ile “sabitleme (fixation)” olarak tanımlanan iki temel hareketi bulunmaktadır. Uyku durumundayken de hareket etmekte olan gözlerin sıçrama hareketi, iki sabitleme odağı arasında gerçekleştirilen çok ani kayma olarak tanımlanmaktadır. Sıçrama hareketini takip eden sabitleme ise, 200 ile 600 ms’lik bir zaman süresince gözün durağan kalması durumudur.

Göz bakış izleme sistemleri birçok farklı tekniğin birleştirilmesiyle oluşmaktadır ve göz takibi de bunun bir parçasıdır. Genel olarak göz takip sistemlerinin yapısı (Şekil 1), “interaktif” ve “tanılayıcı” uygulamalar olarak ikiye ayrılmaktadır (Duchowski, 2007).



Şekil. 1. Göz Takip Uygulamaları Hiyerarşisi

Tanılayıcı uygulamalar, göz bakış verilerini, kullanıcının görsel ve dikkat süreçlerinin nicel bilgisi olarak kullanmaktadır. İnteraktif uygulamalar ise; göz bakış verilerini, elde edilen göz hareketlerine göre kullanıcı ile etkileşim için kullanmaktadır. İnteraktif uygulamalar, kendi içinde “seçmeli” ve “bakışa bağlı” olarak alt kategorilere ayrılmaktadır (Duchowski, 2007; Päivi, 2011). Seçmeli sistemler göz bakışını fare imleci gibi bir seçme aygıtı olarak kullanırken, bakışa bağlı sistemler karmaşık ekranların (grafik ortamlar vb.) hızlı görselleştirilmesini kolaylaştırmak için kullanıcı bakışı bilgisinden faydalanmaktadır. Bu çalışmada da esas alınan, bakışa bağlı uygulamalar “görüntü” ve “model” tabanlı olmak üzere iki grup olarak incelenmektedir.

Mevcut göz izleme teknolojileri elektrookülografi (EOG), skleral kontakt lens, videookülografi (VOG, fotookülografi POG) ve video tabanlı gözbebeği/kornea yansıtma teknikleridir (Duchowski, 2007). Göz pozisyonunun ve hareketinin kaydedilmesi metodu olan “okülografi” ile göz hareketi takibi için kullanılan 4 ana yöntem bulunmaktadır (Bates et al., 2005; Savaş, 2005; Lupu & Ungureanu, 2013).

Elektrookülografi, yaklaşık 40 yıldır göz hareketlerini kaydetmek için kullanılan, göz çevresine elektrotlar yerleştirilerek kornea ve retina arasındaki elektriksel farkın ölçülmesinden yararlanan bir yöntemdir (Duchowski, 2007). Bu yöntemin en büyük avantajı gözler kapalıyken de göz hareketlerini tespit edebilmesidir (Mazo, Barea & Lopez, 2002). Bir diğer teknik olan kontakt lens temelli manyetik arama bobinli göz takip cihazlarında, iki yumuşak lens içine tel bobin ile modifiye edilmiş kontakt lensten oluşmaktadır (Kenyon, 1985). Bu yöntem göz hareketlerinin doğallığı hakkında doğru ve hızlı bilgiler vermektedir. Fakat kullanıcılar için lens rahatsız edici olabilmektedir. Bir diğer teknik olan kızılötesi okülografi yönteminde göz kızılötesi ışık ile aydınlatılmakta ve kızılötesi okülografi göz içerisinde bulunan skleradan yansıyan ışığın yoğunluğunu ölçmektedir. Göz yüzeyinden geri yansıyan kızılötesi ışık miktarı farkı göz pozisyonu hakkındaki değişim bilgisini sağlamaktadır. Kızılötesi okülografi, elektrookülograftan daha az gürültüye sahiptir, fakat harici ışık değişimlerine daha hassas bir tekniktir. Kızılötesi okülografi, görüntü işleme uygulamalarının kullanıldığı kornea yansıtma, Purkinje resim ve göz bebeği izlenmesi teknikleri kullanan birçok ticari uygulamada tercih edilmektedir (Chennamma & Yuan, 2013). Fotookülografi olarak da anılan videookülografi, ticari yazılımlar tarafından son zamanlarda göz hareketi takibi için en çok tercih edilen yöntem konumundadır. Gün ışığı ya da kızılötesi ışık çalışmanın durumuna göre tercih edilmektedir (Hansen & Pece, 2005). Bu sistemde göz görüntüleri bir veya daha fazla kamera ile elde edilebilmekte ve genellikle basit ya da karmaşık düzeyde ölçümler bir ya da birden fazla kamera ile yapılabilmektedir (Hansen & Pece, 2005).

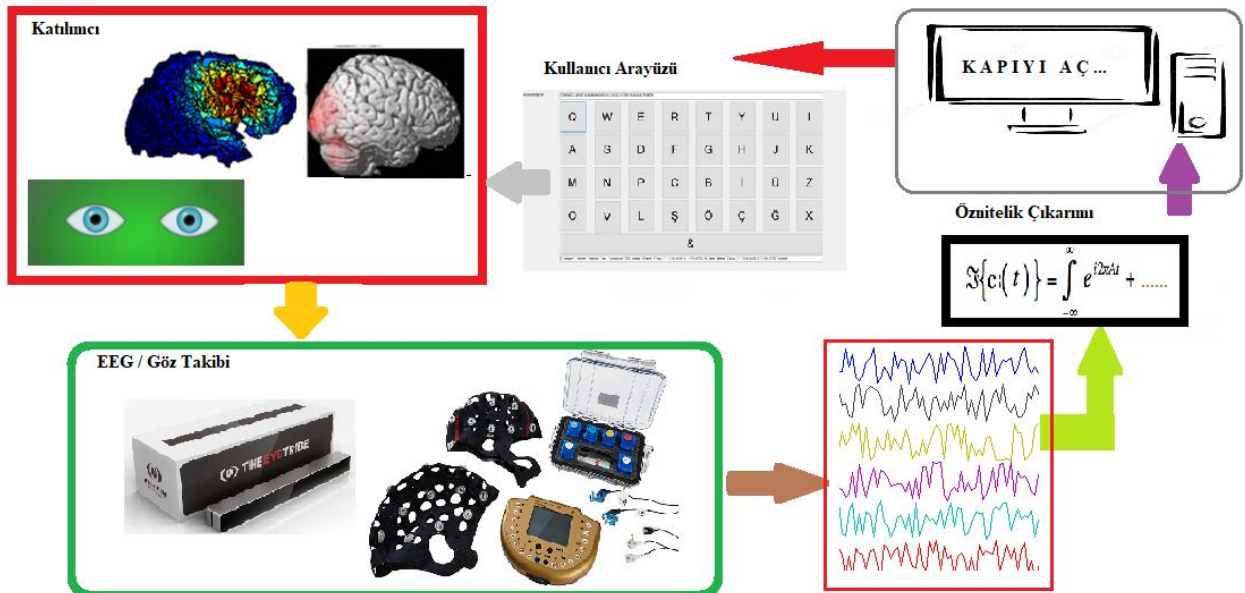
1.1. Göz İzleme Teknolojisi

Göz izleme teknolojisi göz bebeği hareketlerinin gelişmiş kamera ve sensörler yardımı ile izlenerek, kullanıcının nereye baktığı, hangi sıklıkla baktığı, ne kadar süre baktığı, nereye odaklandığı gibi nitel ve nicel veriler sunan bir teknolojidir. Göz takip teknolojisi son yıllarda kaydedilen teknolojik gelişmeler sayesinde literatürde daha sık rastlanmaya başlanmış olsa da, araştırma alanı olarak oldukça eskidir. Bu alanda ilk çalışmalar 1878 yılında Louis Emile Javal tarafından yürütülmeye başlanmıştır (Javal 1978 & 1979). Javal yaptığı çalışmalarla göz hareketlerinin devam eden ve yumuşak bir geçişle değil, sabitlenmeler (fixations) ve sıçramalarla (saccades) tamamlandığını keşfetmiştir (Liversedge et al., 2011). Bu keşifte tanımlanan sabitlenmeler gözün milisaniyelik duraklamalar yapması anlamında olup, sıçramalar ise gözün iki nokta arasında yaptığı hızlı atlayışlardır.

1.2. Beyin Bilgisayar Arayüzü

Beyin Bilgisayar Arayüzleri (BBA), motor sinir sistemi kullanımı olmaksızın birey için çeşitli elektronik ekipmanların (bilgisayar, elektromekanik bir kol veya çeşitli nöroprotezler gibi) kullanımını mümkün kılan teknolojilerdir. Dayanağında insan beyninin yapı taşı olan sinir hücrelerinin (nöronlar) elektrokimyasal etkileşimler ile birbirleriyle haberleşmesi yatmaktadır (Şekil 2). Bu haberleşme sırasında, yüzey elektrotları ile girişimsel olmadan elde edilebilecek olan beyin elektriksel aktivitesi sayesinde, gerçekleşen iletişim hakkında bilgi sağlamak mümkün olabilmektedir. Beynin bilinen anatomik ve fonksiyonel yapısına göre, yerine getirilmesi istenecek ödevlere göre işlenmek istenecek sinyalin seçimi ilgili beyin bölgeleri ölçülerek elde edilebilmektedir (Şekil 2). BBA sistemleri, ölçüm için seçilen değişen elektrot birleşimleri ve bu elektrotlardan ölçümlenen elektriksel sinyallerin değişik yaklaşımlarla analizleriyle oluşturulmaktadır (Şekil 2).

Bu sistemler özellikle Amiyotrofik Lateral Skleroz (ALS) veya Tetrapleji gibi motor fonksiyonların zarar gördüğü rahatsızlıklarda rehabilitasyon amaçlı kullanırken, patolojik durum sözkonusu olmayan kişilerde elektronik cihazları veya herhangi bir elektronik kontrol sistemini kullanabilmeleri amacıyla fayda sağlayabilmektedir.



Şekil 2. Genel bir Beyin Bilgisayar Arayüzü Şeması.

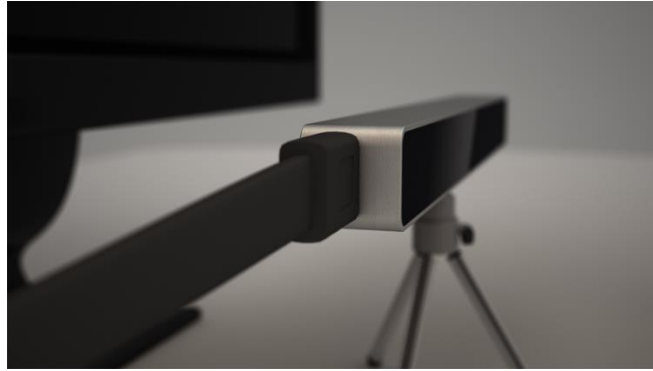
2. Materyal ve Yöntem

Bu BBA çalışmasında, gönüllü katılımcılar 20×1,9×1,9 cm ölçülerindeki, dünyanın en küçük göz izleme cihazı olarak kaydedilen TheEyeTribe cihazı ile ölçümlenmiştir (Şekil 3). The Eye Tribe, USB 3.0 bağlantısı sayesinde yüksek hızlı bilgisayarlar, akıllı telefonlar, ve tabletler gibi cihazlarla uyumlu çalışabilmektedir.

Eye Tribe göz izleyicisinin ana bileşenleri, bir akıllı telefon, bilgisayar vb. içinde kolayca yerleştirilebilen bir kamera ve yüksek çözünürlüklü kızılötesi LED'den oluşmaktadır. Cihaz, göz hareketlerini izlediği kameranın görüntülerini alarak ve bilgisayar-görüntü algoritmalarına tabi tutarak, kullanıcıların göz bebeklerinin en küçük hareketlerini bile izleme imkanına sahiptir. Eye Tribe göz izleyicisi, farklı donanım, kamera sensörleri ve çalışma ortamındaki farklı ışık ayarları ile çalışırken tatmin edici sonuçlar verebilmektedir.

2.1. Göz Takip Cihazının Kurulumu

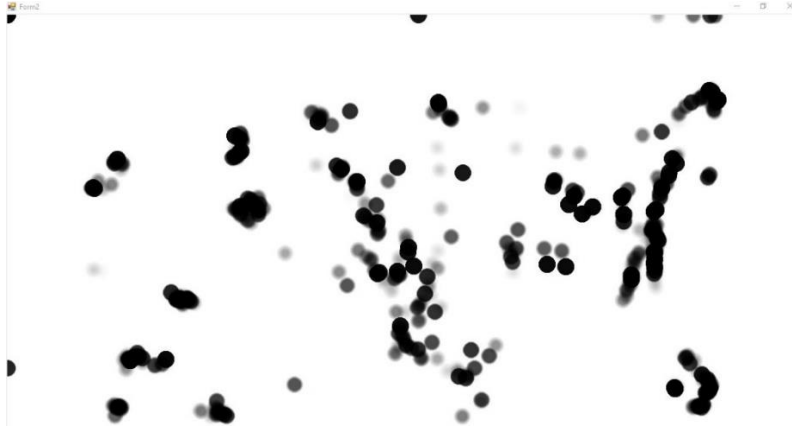
Eye Tribe göz izleme cihazında, sabitleme belli bir noktada gözlere odaklanmaktadır. Bunun için kurulum aşamasında cihazın senkron kalitesi önem taşımaktadır. Kabul edilebilir kalibrasyon sonucu ile cihazın göz hareketleri takibine hazır olması sağlanmaktadır (Şekil 2, katılımcı penceresi - göz görseli). Bu odaklanma ortalama 100-1000 ms arasında olan ve çoğunlukla 200-500 ms arasında gerçekleşen ve işlenen bilginin kalitesi ile mevcut bilişsel yüke bağlı olan düzeltmeler yapmaktadır. Düzeltmeler, gözlerin göreceli olarak durağan görüldüğü, bilgiyi girdiği veya “kodladığı” durumlardır.



Şekil 3. Eye Tribe göz izleme cihazı ve USB 3.0 bağlantısı

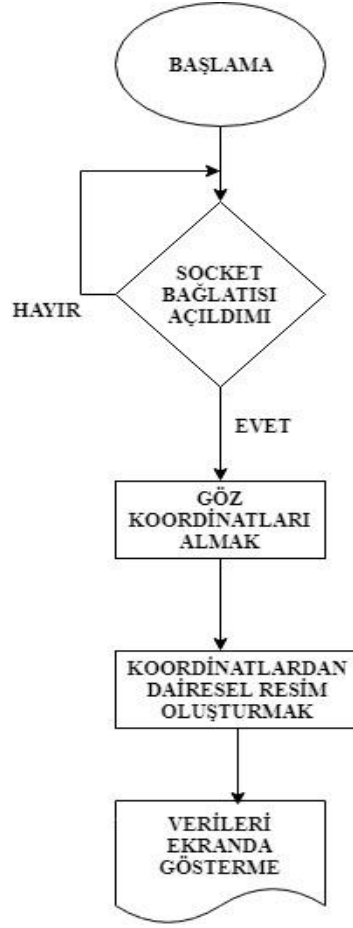
2.2. Eye Tribe Göz Takip Cihazı ile Sıcaklık Haritası Çıkarılması

Eye Tribe göz izleyici ile bilgisayar ekranında kullanıcının hangi noktalara odaklandığının tespiti için sıcaklık haritası çıkarılabilmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Göz izleme sonucu çıkarılan sıcaklık haritası (gri renk skalasında ifade edilmiştir)

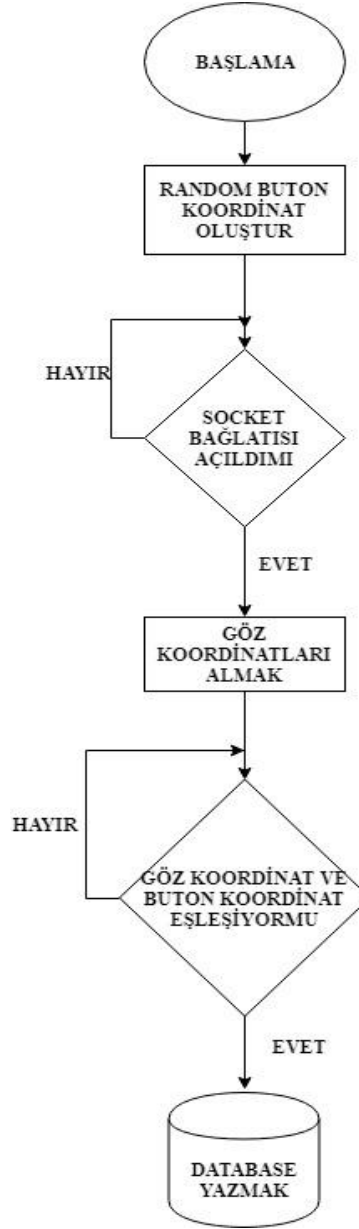
Eye Tribe göz takip cihazı ile gerçekleştirilen çalışmamızın tüm safhalarında, analiz ve veri toplama yazılımları tarafımızca geliştirilmiştir. Burada çıktısı (Şekil 4) paylaşılan sıcaklık haritasını elde etmek için kullanılan kod bloğunun algoritmik çıktısı Şekil 5'te yer almaktadır.



Şekil 5. Sıcaklık Algoritması Şeması

2.3. Göz İzleme Cihazı ile Otomatik Soru Cevap Uygulaması

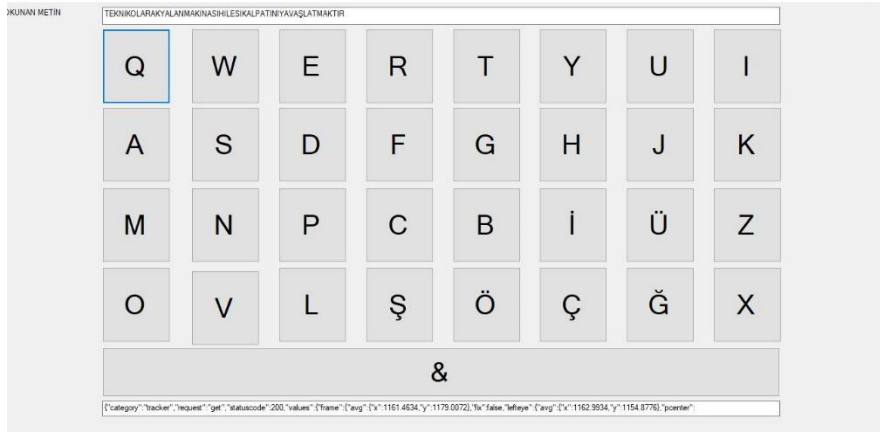
Çalışmanın bu aşamasında, deney/görev tasarımı iki boyutlu bir ortamda ara ve seç görevi şeklinde tasarlanmıştır. Burada amaç, sık kullanılır, gündelik hayattaki ihtiyaç duyulabilecek temel soru(n)lara göz hareketlerine dayalı BBA geliştirebilmektir. Bu amaçla, özel konfigürasyon gerektirmeyen tipik bir bilgisayarda yaygın işletim sistemi yapısında soru penceresi yaratılarak seçilmesi (cevaplanması) ödevi oluşturulmuştur. Eye Tribe göz izleme cihazı ile bilgisayar ekranında otomatik olarak üretilen farklı ve sabit olmayan koordinatlarda çıkan sorulara karşı kullanıcıların odaklanma verileri ve gözleri ile verdikleri tepkilerin analiz edildiği programın akış diyagramı Şekil 6'da paylaşılmaktadır.



Şekil. 6. Otomatik Soru Cevap Akış Diyagramı

2.4. Göz İzleme Cihazı ile Sanal Klavye Uygulaması

Bu aşamada, göz takip cihazı kullanılarak bilgisayar ekranına klavye özelliğinin kazandırılması kurgulanmıştır. Bu noktada amaçlanan, sözkonusu klavye yöntemi ile belirtilen kelime ve cümlelerin yazılması için geçen sürenin tespit edilebilmesidir. Seçilen cümleler veya kelimeler rassal olarak belirlenen metinlerdir. Ekran üstünde yer alan her harfin koordinatları belirlenmiştir. Yazılan metinlerin süre tespiti için okunan her harf veritabanına kaydedilmektedir. Uygulama ekranında (Şekil 7) gönüllü tarafından yazılan her bir harften sonra sistem ses ile uyarı vermektedir. Sanal klavye akış diyagramı Şekil 8’de detaylandırılmıştır.



Şekil. 7. Sanal Klavye Ekran Görüntüsü



Şekil. 8. Sanal Klavye Uygulaması Akış Diyagramı

2.5. Veritabanı ve Tablo Yapısı

Veritabanı sunucu yazılım türlerinden biri olmakla beraber MS SQL (Microsoft – Structured Query Language)’in veritabanı altyapısı ile çevrimiçi veya çevrimiçi olmayan işlemler için ilişkisel veritabanları geliştirilebilmektedir. Oluşturduğumuz bu veritabanları üzerinde tablolar oluşturularak veriler kolay bir şekilde yönetilerek (Ekleme, Güncelleme, Silme, Listeleme v.b.) güvenli bir şekilde saklanabilmektedir. Bu kapsamda geliştirilen uygulamada yer alan veritabanı tablo örnekleri Şekil 9 ve 10’da sunulmaktadır.

Column Name	Data Type	Allow Nulls
id	int	<input type="checkbox"/>
soru	nvarchar(255)	<input checked="" type="checkbox"/>
tarih	nvarchar(255)	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>

Şekil. 9. Soru Veritabanı Şeması

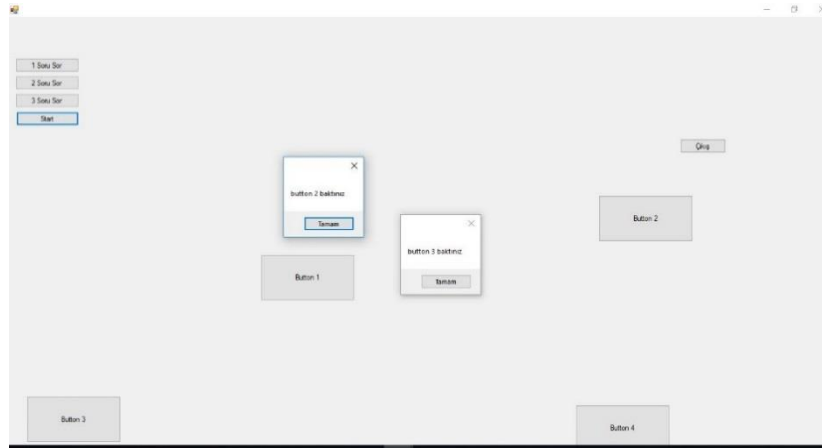
Column Name	Data Type	Allow Nulls
id	int	<input type="checkbox"/>
butonmesaj	nvarchar(255)	<input checked="" type="checkbox"/>
butonsuresi	nvarchar(255)	<input checked="" type="checkbox"/>
soyu	nvarchar(255)	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>

Şekil. 10. Cevap Veritabanı Şeması

3. Bulgular

3.1. Göz İzleme Cihazı ile Otomatik Soru Cevap Uygulaması

Eye Tribe göz izleyici ile bilgisayar ekranında çıkan sorular karşısında (Şekil 11) kullanıcıların göz hareketlerinin takibi ve kaydı gerçekleştirilmiş olup, göz takip parametreleri (odaklanma, geçirilen süre 'dwell time' vb.) analiz edilmiştir. Göz hareketleri takibi ile uygulama esnasındaki ölçümlerden elde edilen otomatik buton oluşturma ve tıklanma süresi verileri analiz için kullanılmıştır (Tablo 1).



Şekil. 11. Program Ekran Görüntüsü

Tablo 1. Otomatik Buton Oluşma ve Tıklanma Süresi Tablosu
(Süre, yıl-ay-gün saat:dakika:saniye.milisaniye biçiminde sunulmuştur).

Yıl-ay-gün saat:dk:s.ms Buton durumu

2018-11-25 13:11:49.788 Buton Oluşturdu.
2018-11-25 13:11:52.735 Buton Tıklandı
2018-11-25 13:11:52.880 Buton Oluşturdu.
2018-11-25 13:11:55.828 Buton Tıklandı
2018-11-25 13:11:55.836 Buton Oluşturdu.
2018-11-25 13:11:58.832 Buton Tıklandı
2018-11-25 13:11:59.521 Buton Oluşturdu.
2018-11-25 13:12:02.469 Buton Tıklandı
2018-11-25 13:12:02.524 Buton Oluşturdu.
2018-11-25 13:12:05.527 Buton Tıklandı
2018-11-25 13:12:05.528 Buton Oluşturdu.
2018-11-25 13:12:05.529 Buton Tıklandı
2018-11-25 13:12:05.530 Buton Oluşturdu.
2018-11-25 13:12:08.530 Buton Tıklandı
2018-11-25 13:12:08.976 Buton Oluşturdu.
2018-11-25 13:12:11.915 Buton Tıklandı

Tablo 1(devam). Otomatik Buton Oluşma ve Tıklanma Süresi Tablosu
(Süre, yıl-ay-gün saat:dakika:saniye.milisaniye biçiminde sunulmuştur).

Yıl-ay-gün saat:dk:s.ms Buton durumu

2018-11-25 13:12:11.997 Buton Oluşturdu.
 2018-11-25 13:12:15.054 Buton Tıklandı
 2018-11-25 13:12:15.071 Buton Oluşturdu.
 2018-11-25 13:12:18.062 Buton Tıklandı
 2018-11-25 13:12:18.162 Buton Oluşturdu.
 2018-11-25 13:12:21.114 Buton Tıklandı
 2018-11-25 13:12:21.116 Buton Oluşturdu.
 2018-11-25 13:12:21.164 Buton Tıklandı
 2018-11-25 13:12:21.165 Buton Oluşturdu.
 2018-11-25 13:12:24.167 Buton Tıklandı
 2018-11-25 13:12:24.169 Buton Oluşturdu.
 2018-11-25 13:12:27.171 Buton Tıklandı
 2018-11-25 13:12:27.365 Buton Oluşturdu.
 2018-11-25 13:12:30.178 Buton Tıklandı
 2018-11-25 13:12:30.179 Buton Oluşturdu.
 2018-11-25 13:12:30.367 Buton Tıklandı
 2018-11-25 13:12:30.368 Buton Oluşturdu.
 2018-11-25 13:12:33.369 Buton Tıklandı
 2018-11-25 13:12:33.376 Buton Oluşturdu.
 2018-11-25 13:12:36.378 Buton Tıklandı
 2018-11-25 13:12:39.412 Buton Oluşturdu.
 2018-11-25 13:12:42.440 Buton Tıklandı

Göz takip verileri incelendiğinde, çalışmanın ilk fazı olan otomatik soru cevap uygulaması bölümünde, otomatik buton oluşturma ve tıklanma süresi verilerinin genel olarak ortalama 3 saniye süresinde çıkan butonların hepsine tıklanma işlemi gerçekleştirilmiştir. İlgili otomatik soru cevap tablo yapısı Şekil 12’de gösterilmektedir.

Column Name	Data Type	Allow Nulls
id	int	<input type="checkbox"/>
buton_zaman	nvarchar(250)	<input checked="" type="checkbox"/>
buton_aciklama	nvarchar(250)	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>

Şekil. 12. Otomatik Soru Cevap Tablo Yapısı

3.2. Göz İzleme Cihazı ile Sanal Klavye Uygulaması

Bu aşamada yöntem 2.4 bölümünde sunulan içerik ölçüm bulguları sunulmaktadır. Göz takip cihazı kullanılarak bilgisayar ekranına sanal klavye özelliği kazandırılarak, belirtilen kelime ve cümlelerin yazılması için geçen süreler kayıtlanmıştır (Tablo 2). Ekranda beliren her harfin koordinatlarının belirlenmesi ve okunan her harf veritabanına kaydedilmesi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Sanal Klavye Aracılığıyla Okutulan Metin
(Süre, yıl-ay-gün saat:dakika:saniye.milisaniye biçiminde sunulmuştur).

Metin	Yıl-ay-gün saat:dk:s.ms
B	2018-06-04 17:56:08.656
O	2018-06-04 17:56:11.655
R	2018-06-04 17:56:14.655
S	2018-06-04 17:56:17.657
A	2018-06-04 17:56:20.655
D	2018-06-04 17:56:23.641
A	2018-06-04 17:56:26.656

Tablo 2(devam). Sanal Klavye Aracılığıyla Okutulan Metin
(Süre, yıl-ay-gün saat:dakika:saniye.milisaniye biçiminde sunulmuştur).

Metin	Yıl-ay-gün saat:dk:s.ms
İ	2018-06-04 17:56:29.641
Ş	2018-06-04 17:56:32.643
L	2018-06-04 17:56:35.641
E	2018-06-04 17:56:38.640
M	2018-06-04 17:56:41.672
Y	2018-06-04 17:56:44.657
A	2018-06-04 17:56:47.655
P	2018-06-04 17:56:59.654
A	2018-06-04 17:57:02.654
N	2018-06-04 17:57:05.642
A	2018-06-04 17:57:08.647
Y	2018-06-04 17:57:11.641
E	2018-06-04 17:57:14.642
T	2018-06-04 17:57:17.641
K	2018-06-04 17:57:20.641
İ	2018-06-04 17:57:26.655
B	2018-06-04 17:57:32.655
E	2018-06-04 17:57:35.656
L	2018-06-04 17:57:38.656
G	2018-06-04 17:57:41.656
E	2018-06-04 17:57:44.655
S	2018-06-04 17:57:47.641
İ	2018-06-04 17:57:50.640
Z	2018-06-04 17:57:53.642
O	2018-06-04 17:57:56.642
R	2018-06-04 17:57:59.642
U	2018-06-04 17:58:02.672
N	2018-06-04 17:58:08.656
L	2018-06-04 17:58:11.654
U	2018-06-04 17:58:17.657
O	2018-06-04 17:58:20.655
L	2018-06-04 17:58:35.640
D	2018-06-04 17:58:38.641
U	2018-06-04 17:58:41.642

Column Name	Data Type	Allow Nulls
id	int	<input type="checkbox"/>
Harf	nchar(1)	<input checked="" type="checkbox"/>
zaman	nvarchar(50)	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>

Şekil 13. Sanal Klavye Veritabanı Yapısı

Uygulamanın veritabanı yapısı Şekil 13'te belirtildiği gibidir. Sanal klavye uygulamasında beş farklı kullanıcıya “Borsada İşlem Yapana Yetki Belgesi Zorunlu Oldu” örnek cümlesi okutulmuş ve okutulan bu metinlerin analiz sonuçları Tablo 3'te kelime bazında gösterilmiştir.

Tablo 3. Örnek Cümle ve Analiz Sonuçları

DENEK 1					
AD	HARF	BAŞLAMA SÜRESİ	BİTİŞ SÜRESİ	OKUNMA SÜRESİ	
1 BORSADA	7	01.02.2019 14:47:51,419	01.02.2019 14:48:14,026	00:00:22,607	
2 İŞLEM	5	01.02.2019 14:48:16,860	01.02.2019 14:48:42,401	00:00:25,541	
3 YAPANA	6	01.02.2019 14:48:45,403	01.02.2019 14:49:00,386	00:00:14,983	
4 YETKİ	5	01.02.2019 14:49:03,392	01.02.2019 14:49:24,402	00:00:21,010	
5 BELGESİ	7	01.02.2019 14:49:33,402	01.02.2019 14:50:15,388	00:00:41,986	
6 ZORUNLU	7	01.02.2019 14:50:18,417	01.02.2019 14:50:48,404	00:00:29,987	
7 OLDU	4	01.02.2019 14:50:51,404	01.02.2019 14:51:06,416	00:00:15,012	
TOPLAM				00:02:51,126	
DENEK 2					
AD	HARF	BAŞLAMA SÜRESİ	BİTİŞ SÜRESİ	OKUNMA SÜRESİ	
1 BORSADA	7	01.02.2019 14:52:03,978	01.02.2019 14:52:42,979	00:00:39,001	
2 İŞLEM	5	01.02.2019 14:52:45,979	01.02.2019 14:53:21,979	00:00:35,000	
3 YAPANA	6	01.02.2019 14:53:24,981	01.02.2019 14:53:51,995	00:00:27,014	
4 YETKİ	5	01.02.2019 14:53:58,213	01.02.2019 14:54:13,217	00:00:15,004	
5 BELGESİ	7	01.02.2019 14:54:19,199	01.02.2019 14:54:55,197	00:00:35,998	
6 ZORUNLU	7	01.02.2019 14:55:01,198	01.02.2019 14:55:28,214	00:00:27,016	
7 OLDU	4	01.02.2019 14:55:40,200	01.02.2019 14:55:55,229	00:00:15,029	
TOPLAM				00:03:15,062	
DENEK 3					
AD	HARF	BAŞLAMA SÜRESİ	BİTİŞ SÜRESİ	OKUNMA SÜRESİ	
1 BORSADA	7	01.02.2019 15:13:27,699	01.02.2019 15:13:48,704	00:00:21,005	
2 İŞLEM	5	01.02.2019 15:13:51,666	01.02.2019 15:14:06,688	00:00:15,022	
3 YAPANA	6	01.02.2019 15:14:12,685	01.02.2019 15:14:30,668	00:00:17,983	
4 YETKİ	5	01.02.2019 15:14:33,665	01.02.2019 15:14:57,000	00:00:23,335	
5 BELGESİ	7	01.02.2019 15:14:57,691	01.02.2019 15:15:42,683	00:00:44,992	
6 ZORUNLU	7	01.02.2019 15:15:45,715	01.02.2019 15:16:42,706	00:00:56,991	
7 OLDU	4	01.02.2019 15:17:09,716	01.02.2019 15:17:21,701	00:00:11,985	
TOPLAM				00:03:11,313	
DENEK 4					
AD	HARF	BAŞLAMA SÜRESİ	BİTİŞ SÜRESİ	OKUNMA SÜRESİ	
1 BORSADA	7	01.02.2019 16:04:37,341	01.02.2019 16:04:55,292	00:00:17,951	
2 İŞLEM	5	01.02.2019 16:05:04,291	01.02.2019 16:05:34,306	00:00:30,015	
3 YAPANA	6	01.02.2019 16:05:37,292	01.02.2019 16:06:01,308	00:00:24,016	
4 YETKİ	5	01.02.2019 16:06:04,304	01.02.2019 16:06:43,308	00:00:39,004	
5 BELGESİ	7	01.02.2019 16:06:49,300	01.02.2019 16:07:16,323	00:00:27,023	
6 ZORUNLU	7	01.02.2019 16:07:22,313	01.02.2019 16:08:01,328	00:00:39,015	
7 OLDU	4	01.02.2019 16:08:10,308	01.02.2019 16:08:19,311	00:00:09,003	
TOPLAM				00:03:06,027	

Tablo 3(devam). Örnek Cümle ve Analiz Sonuçları

DENEK 5					
AD	HARF	BAŞLAMA SÜRESİ	BİTİŞ SÜRESİ	OKUNMA SÜRESİ	
1 BORSADA	7	01.02.2019 16:14:57,720	01.02.2019 16:15:15,698	00:00:17,978	
2 İŞLEM	5	01.02.2019 16:15:18,698	01.02.2019 16:15:30,697	00:00:11,999	
3 YAPANA	6	01.02.2019 16:15:33,698	01.02.2019 16:16:09,697	00:00:35,999	
4 YETKİ	5	01.02.2019 16:16:12,699	01.02.2019 16:16:36,717	00:00:24,018	
5 BELGESİ	7	01.02.2019 16:16:39,713	01.02.2019 16:17:09,713	00:00:30,000	
6 ZORUNLU	7	01.02.2019 16:17:12,717	01.02.2019 16:17:51,712	00:00:38,995	
7 OLDU	4	01.02.2019 16:17:54,715	01.02.2019 16:18:06,697	00:00:11,982	
TOPLAM				00:02:50,971	

4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, literatürde hibrid olarak da anılan (Pfurtscheller et al., 2006; Allison, Wolpaw & Wolpaw, 2007; Zander & Gärtner, 2011), farklı modalitelerin katkısı ile güncellenmiş beyin bilgisayar arayüzü (BBA) sistemlerine katkı olarak göz takibi cihazı teknolojisine dayalı yeni bir hibrid BBA oluşturulması ve sonuçlarının analizi hedeflenmiştir.

Bu çalışmada, göz hareketleri takibi ile ilk veri akışının elde edilmesinden, sanal klavye uygulamasına kadar üç farklı deney tasarımında ölçümleme gerçekleştirilmiştir. Tüm aşamalarda kullanılan yazılım ve analiz tarafımızca geliştirilmiştir. Sıcaklık haritası uygulamasında kullanıcıların ekranda baktıkları yerler canlı olarak çizdirilmiştir. Soru cevap sisteminde kullanıcılara ekrandan sorular gösterilmiş ve bunlara verdikleri cevapların süreleri incelenmiştir. Beş gönüllü katılımcının yanıt süreleri en fazla 3 saniye en az 200 milisaniye olarak tespit edilmiştir. Bir diğer ölçüm paradigması olarak kurgulanan otomatik soru ve cevap verme sisteminde ise ekranda koordinat olarak rastgele gösterilen butonlara kullanıcıların tıklama süreleri ölçümlenmiştir. Elde edilen bulgular literatürdeki (Zander & Gärtner, 2011) uzun ve kısa geçirilen süre karşılaştırmalarının kısa 'dwell' zamanı için 3.98s. olduğu sonuçlardan daha kısa olarak saptanmıştır.

Sanal klavye uygulamasında beş farklı kullanıcıya örnek cümle okutulmuş ve toplam tüm cümleyi okuma sürelerinin 2:50,971 ile 3:15,062 dakika arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Analiz kapsamında tespit edilen sürelerin hızlanmasında ilerleyen dönemlerde bu alanda gerçekleştirilecek çalışmaların bireysel kullanıcılara katkısının artarak devam etmesini sağlayacaktır.

Modern teknoloji ile birlikte göz teknolojisi ilerleyen yıllarda insan hareketlerinin algılanması ve hareket yetisini kaybetmiş kişilerin göz hareketleri ile bildirim yapmalarını sağlayan sistemlerin tasarlanmasında en önemli uzmanlık alanlarından biri olacaktır. Bulgular, göz hareketlerine dayalı beyin bilgisayar arayüzü çalışmalarının umut verici olduğunu ve gelecek teknolojilerde göz takibine dayalı modalitelerin dokunma veya motor komut olmadan etkileşime dayalı teknolojilerin medikal uygulamalar ve de sağlıklı kullanıcılar için öne çıkacağını göstermektedir.

Referanslar

- Allison, B.Z., Wolpaw, E.W., & Wolpaw J.R. (2007). Brain computer interface systems: progress and prospects. *Expert Review of Medical Devices*, 4(4), 463-474. doi:10.1586/17434440.4.4.463
- Bates, R., Istance, H., Oosthuizen, L., & Majaranta, P. (2005). D2.1 Survey of De-Facto Standards in Eye Tracking. *Communication by Gaze Interaction (COGAIN)*, IST-2003-511598: Deliverable 2.1.
- Bolt, R.A. (1982). *Eyes at the Interface*. Proceedings of the 1982 Conference on Human Factors in Computing Systems, 360-362. New York: ACM Press. doi:10.1145/800049.801811
- Chennamma, H. R. & Yuan, X. (2013) A survey on eye-gaze tracking techniques. *Indian Journal of Computer Science and Engineering (IJCSSE)*, 4(5): 388-393. arXiv:1312.6410
- Duchowski, A. T. (2007). *Eye Tracking Methodology: Theory and Practice*, second Edition. London: Springer Verlag.
- Engell-Nielsen, T., Glenstrup, A.J., & Hansen, J.P. (2003). Eye Gaze Interaction: A New Media - Not Just a Fast Mouse. In Itoh, K., Komatsubara, A., Kuwano, S. (Eds.), *Handbook of Human Factors / Ergonomics* (pp. 445-455). Tokyo, Japan: Asakura Publishing.
- Galán, F., Nuttin, M., Lew, E., Ferrez, P. W., Vanacker, G., Philips, J., & Millán, J. R. (2008). A brain-actuated wheelchair: asynchronous and non-invasive Brain-computer interfaces for continuous control of robots. *Clinical Neurophysiology*, 119(9), 2159-2169. doi:10.1016/j.clinph.2008.06.001

- Hansen, D. & Pece, A. (2005). Eye tracking in the wild. *Computer Vision and Image Understanding* 98(1), 155-181. doi:10.1016/j.cviu.2004.07.013
- Hutchinson, T.F. (1993). Eye Gaze Computer Interfaces: Computers That Sense Eye Positions on the Display. *Computer*, 26, 65-67. doi:10.1109/MC.1993.620436
- Jacob, R.J.K. (1993). What You Look at Is What You Get. *IEEE Computer*, 26, 65-66. doi:10.1109/MC.1993.274943
- Javal L. (1878). Essai sur la physiologie de la lecture. *Annales d'Oculistique*. 80, 240–274.
- Javal L. (1879). Essai sur la physiologie de la lecture. *Annales d'Oculistique*. 82, 242–253.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Kenyon, V. R. (1985). A soft contact lens search coil for measuring eye movements. *Vision Research*, 25(11): 1629-1633. doi:10.1016/0042-6989(85)90133-6
- Liversedge, S., Gilchrist, I., & Everling, S. (2011). *The Oxford Handbook of Eye Movements*. OUP Oxford.
- Lupu, R.G. & Ungureanu, F. (2013). A survey of eye tracking methods and applications. *The Polytechnic Institute of Science Bulletin*, (3), 71-86.
- Mazo, L., Barea, M., Boquete, R., & Lopez, E. (2002) System for assisted mobility using eye movements based on electrooculography. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 10(4): 209-218. doi:10.1109/TNSRE.2002.806829
- Murata, A. (2006). Eye Gaze Input Versus Mouse: Cursor Control as a Function of Age. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 21, 1-14. doi:10.1080/10447310609526168
- Nilsson, S., Gustafsson, T., & Carleberg, P. (2007). Hands Free Interaction with Virtual Information in a Real Environment (pp. 53-57). *Proceedings of COGAIN 2007*, Leicester, UK.
- Päivi, M. (2011). *Gaze Interaction and Applications of Eye Tracking: Advances in Assistive Technologies*. IGI Global, 31 Eki 2011. doi:10.4018/978-1-61350-098-9
- Pfurtscheller, G., Scherer, R., Müller-Putz, G. (2006). Heart Rate-Controlled EEG-Based BCI: The Graz Hybrid BCI. In *Proceedings of the 3rd International Brain-Computer Workshop and Training Course 2006*. Graz University of Technology Publishing House, Graz, Austria.
- Savaş, Z. (2005). Real-time detection and tracking of human eyes in video sequences, *Doktora Tezi*, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Yarbus, A.L. (1967). Eye Movements During Perception of Complex Objects. In Riggs, L.A. (Ed.). *Eye Movements and Vision* (pp. 171—196). New York: Plenum Press. doi:10.1068/i0382
- Wolpaw, J.R., Birbaumer, N., McFarland, D.J., Pfurtscheller, G., & Vaughan, T.M. (2002). Brain–computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113, 767–791. doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00057-3
- Zander, T.O. & Gärtner, M. (2011). Combining Eye Gaze Input With a Brain–Computer Interface for Touchless Human–Computer Interaction. *International Journal of Human-Computer Interaction*. p.1-26. doi:10.1080/10447318.2011.535752



Anodizasyon ve Elektriksel Boşalma Plazma Oksidasyon Yüze İşlemlerinin Ti6Al4V Alaşımının Aşınma Direncine Etkisi

The Effect of Anodization and Glow Discharge Plasma Oxidation Surface Treatments on the Wear Resistance of Ti6Al4V Alloy

Özgü Bayrak¹, Hojjat Ghahramanzadeh Asl²

¹Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 24100 Erzincan, TÜRKİYE

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 61080 Trabzon, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 23/04/2019

Kabul / Accepted: 09/10/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Günümüzde titanyum ve alaşımları yüksek biyouyumluluk ve düşük elastisite modülüne sahip olmaları nedeniyle çeşitli implantların üretiminde kullanılmaktadır. Titanyum ve alaşımlarının dezavantajlarından biri, yüksek sürtünme katsayısı ve düşük aşınma dayanımına sahip olmalarıdır. Bu dezavantajı gidermek için titanyum ve alaşımlarının yüzeylerine bir takım işlemler uygulanarak başta aşınma direnci olmak üzere yüzey özelliklerinin iyileşmesi sağlanabilmektedir. Bu çalışmada, yük taşıyan implant üretiminde kullanılan Ti6Al4V (Grade 5) taban malzemesi plazma oksitleme ve anodik oksitleme (anodizasyon) işlemlerine tabi tutulmuştur. İki farklı oksitleme işleminden elde edilen yüzeyler sertlik, yüzey pürüzlülüğü, ıslanabilirlik ve aşınma direnci açısından işlemsiz malzeme ile karşılaştırılmıştır. Bu testlerin gerçekleştirilmesi için XRD, SEM, AFM, Mikro sertlik cihazı, Temas açısı ölçüm cihazı ve Doğrusal aşınma cihazı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda sertlik değeri işlemsiz malzemeye göre plazma oksitleme için %116 ve anodik oksitleme için %36 artış göstermiştir. Yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde, plazma oksitleme işleminin yüzey pürüzlülüğünde %11 artış ve anodik oksitleme işleminin %33 düşüşe sebep olduğu görülmüştür. Temas açısı değerleri işlemsiz malzeme için 48,31° iken plazma oksitleme işlemi sonrası 73,34° ve anodik oksitleme işlemi sonrası 85,36° olmuştur. Ayrıca her iki oksitleme işlemi sonrası işlemsiz malzemeye nazaran tribolojik özelliklerin iyileştiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Ti6Al4V, Anodizasyon, Plazma oksidasyon, Aşınma, Sertlik”

Abstract

Nowadays, titanium and its alloys are used in the production of various implants due to their high biocompatibility and low modulus of elasticity. One of the disadvantages of titanium and its alloys is their high friction coefficient and low wear resistance. In order to overcome this disadvantage, a number of processes can be applied to the surfaces of titanium and its alloys to improve surface properties, especially wear resistance. In this study, Ti6Al4V (Grade 5) base material used in the load bearing implant production was subjected to plasma oxidation and anodic oxidation (anodization) processes. The surfaces obtained from two different oxidation processes were compared with the untreated material in terms of hardness, surface roughness, wettability and wear resistance. XRD, SEM, AFM, Micro hardness tester, Contact angle measurement device and Reciprocating sliding wear device were used for the realization of these tests. As a result of the study, the hardness value showed an increase of 116% for plasma oxidation and 36% for anodic oxidation according to the untreated material. When the surface roughness was examined, it was seen that the plasma oxidation process caused an 11% increase and anodic oxidation process caused a 33% decrease in surface roughness. The contact angle values were 48,31° for the untreated material, it was reached 73,34° after the plasma oxidation and 85,36° after the anodic oxidation process. In addition, it was observed that tribological properties were improved after both oxidation processes in comparison to untreated materials.

Key Words

“Ti6Al4V, Anodization, Plasma oxidation, Wear, Hardness”

1. Giriş

Titanyum ve alaşımları, son 60 yıldır hafiflik ve yüksek mekanik özelliklerin tercih edildiği uçak sanayiinde, diğer yolcu taşıtlarının inşasında, çeşitli makine parçaları ve cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Titanyum ve başta Ti6Al4V (Grade 5) olmak üzere titanyum alaşımları ayrıca tıbbî alanda, farklı implant türlerinin (Kalça, diz, omuz, diş protezleri, sabitleme vidaları, plakalar vb.) imalatında da kullanılmaktadır (Januszewicz & Siniarski, 2006; Runa, Mathew, & Rocha, 2013). Ortopedik implantların üretiminde kullanılan titanyum alaşımları mekanik ve kimyasal bozulmalar ile karşı karşıyadır. Çok iyi biyouyumluluk ve düşük elastisite modülüne (E) sahip olmalarına ve korozyon dirençleri yüksek olmasına karşın bu alaşımlar insan vücudundaki sıvılar ile temas ettiklerinde korozyon hasarına uğrayabilmektedirler (Runa et al., 2013). Titanyum ve alaşımları yüksek sürtünme katsayısı ve düşük aşınma dayanımı gibi zayıf tribolojik özellikler göstermektedir (Dong & Bell, 2000). Titanyum ve alaşımları, korozyon ve biyouyumluluk özelliklerini yüzeylerinde bulunan birkaç nanometre kalınlığındaki pasif oksit tabakasına borçludur. Normalde bozunduğu zaman kendisini yenileyebilen bu tabakada bozunmanın sürekli olduğu durumlarda ve/veya ortamın yenilemeye imkân sağlamayacak kimyasallar içermesi durumunda korozyon hasarı oluşabilmektedir. Bu hasar ise, implantın çatlamaya başlamasına veya erken kırılmasına ve ayrıca ömrünü önemli ölçüde kısaltabilen ciddi inflamatuvar reaksiyonlara, osteolize veya alerjilere neden olabilir (Runa et al., 2013).

Biyomedikal alanda ilk olarak saf titanyum kullanılmış, sonrasında ise Hegzagonal kafes yapısına sahip alfa ve Yüzey Merkezli Kübik (YMK) kafes yapısına sahip beta fazlarından oluşan ikili faz yapısındaki Ti6Al4V alaşımının kullanımına başlanmıştır. Ancak bu alaşım kimyasal olarak soy kabul edilmesine karşın, vücut ortamıyla uzun süreli temasında merkezi sinir sistemi tahribatı ve kanser gibi birtakım problemlere neden olabileceğine dair şüpheler belirtilmiştir (Zieliński et al., 2010). Ayrıca, alaşım yapısında bulunan elementlerin belli bir oranın üzerinde vücuda salınmasının kemik iyileşmesini de yavaşlattığı tespit edilmiştir (Balazic, Kopac, Jackson, & Ahmed, 2007; Kuroda, Niinomi, Morinaga, Kato, & Yashiro, 1998; Y. Li, Wong, Xiong, Hodgson, & Wen, 2010). Titanyum, oksijene karşı olan ilgisi yüksek bir elementtir ve havayla temas ettiğinde mikro saniyeler içerisinde bir oksit yüzey filmi oluşturur. Bu film oldukça ince olsa da yüzeye çok iyi tutunmaktadır. Titanyumun yüzeyindeki oksit film kimyasal olarak soy bir karakterde olup, metale üstün korozyon ve biyouyumluluk özelliği verir. Bu nedenle oluşan oksit yapısı “pasif film” ve titanyum da “pasifleşen metal” olarak anılır (Park & Lakes, 2007). Titanyum üzerinde var olduğu bilinen söz konusu oksit filminin bir takım yüzey mühendisliği teknikleri ile iyileştirilmesi veya yeni yüzey yapıları elde edilmesi sureti ile söz konusu alaşım elementlerinin vücut ortamına salınmasının önüne geçilmesi teorik olarak mümkündür (Lu et al., 2018).

Bütün metalik malzemelere olduğu gibi titanyum ve alaşımlarına da bir takım yüzey işlemleri ve/veya kaplamaları yapılarak başta aşınma direnci olmak üzere yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi yönünde çalışmalar süregelmektedir. Genellikle öne çıkan düşünce, malzeme yüzeyinde bulunan doğal oksit tabakasının kalınlaştırılması üzerinedir. (Bayrak, 2013; Fu & Batchelor, 1998; Stratton & Graf, 2010; Yetim, Yıldız, Vangolu, Alsan, & Celik, 2009). Bu nedenle titanyum ve alaşımları üzerinde oksit oluşturma amaçlı pek çok yöntem kullanılmaktadır. Oksitleme yüzey işlemleri genellikle Al, Mg, Ti, Cr gibi oksijene ilgisi yüksek metallere uygulanan teknikler olup, gaz atmosferinde sıcaklık ile (termal oksitleme), plazma atmosferinde veya bir çözelti (anodizasyon, plazma elektrolitik oksidasyon) içerisinde gerçekleştirilebilir. Oksitleme yüzey işlemlerinde temel amaç, bir metal üzerinde yüzey enerjisini arttırmak, bir seramik oksit filmi oluşturmak veya var olan doğal oksit tabakasını kalınlaştırmaktır (Meichsner, Schmidt, Schneider, & Wagner, 2012; Strobel, Lyons, & Mittal, 1994).

Anodizasyon, termal oksitleme işlemlerinden sonra en sık kullanılan yüzey oksit tabakası oluşturma yöntemidir. Düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebilmesi, kullanılacak ekipmanın ucuz olması ve işlem parametrelerinin ve dolayısı ile oksit tabakası kalınlığının kontrol edilebilmesi gibi avantajları vardır. Diğer taraftan, oksit tabakasının belirli bir kalınlığı aşmaması ve herhangi bir difüzyon bölgesi oluşmaması bu yöntemin önemli dezavantajları arasındadır. Plazma oksitleme ise, işlem süresini kısaltması, yüksek sıcaklıklara çıkılabilmesi neticesinde termodinamik olarak daha kararlı yapıların elde edilebilmesi, plazmanın numunenin tüm yüzeyini sararak homojen bir yüzey yapısı elde edilmesi ve kullanılan gaz atom/ionların malzeme içine yayınarak bir difüzyon bölgesi oluşturabilmesi gibi çok sayıda avantajı olan bir yöntemdir.

Bu çalışmada, yük taşıyan implant üretiminde sıklıkla kullanılan Ti6Al4V taban malzemesi plazma oksitleme ve anodik oksitleme (anodizasyon) işlemlerine tabi tutularak yapılan yüzey işlemlerinin sertlik, pürüzlülük ve su tutma özellikleri ve tribolojik performansları incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada hegzagonal yapıda olan alfa ve yüzey merkezli kübik yapıda olan beta ikili faz yapısına sahip olan Ti6Al4V alaşımı kullanılmıştır. Bu alaşım, yük taşıyıcı protezlerin üretiminde sıklıkla kullanılmakta ve ticari saf titanyuma tercih edilmektedir. Alaşımın ağırlık yüzdeleri cinsinden standart kimyasal bileşimi Tablo 1’de ve mekanik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan alaşımın kimyasal bileşimleri (% ağırlık)

	Bileşenler (%)								Diğer
	Al	V	Fe	O	C	H	N	Ti	
Taban Malzeme	6,25	3,71	<0,40	<0,20	<0,08	<0,015	<0,05	Kalan	<0,4
ASTM B-348	5,5-6,75	3,5-4,5	<0,40	<0,20	<0,08	<0,015	<0,05	87-91	<0,4

Tablo 2. Kullanılan alaşımın mekanik özellikleri (Welsch, Boyer, & Collings, 1993)

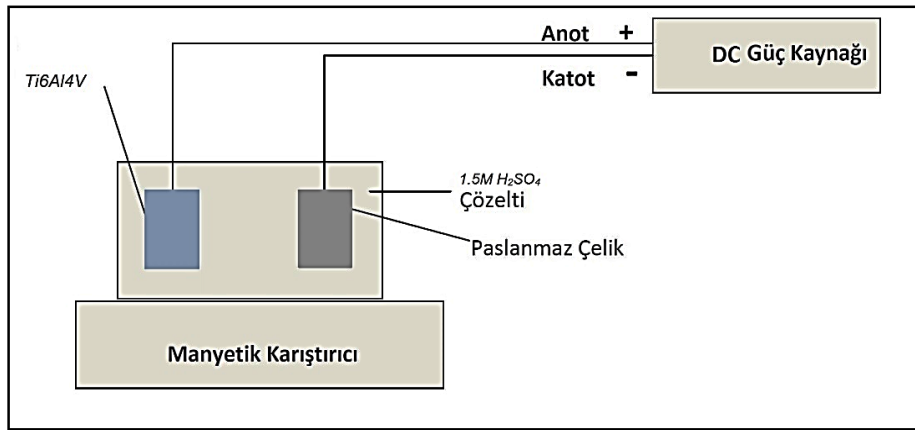
Akma Noktasında (0,20%) Gerilme (MPa)	600-700
Çekme Gerilmesi (MPa)	850-900
Kopma Birim Uzaması (%)	12-15
Elastisite (Young) Modülü (GPa)	110-120
Poisson Oranı	0,33-0,35
Yoğunluk ($gr \cdot cm^{-3}$)	4,4-4,5

2.1. Numunelerin Hazırlanması

Ti6Al4V alaşımı numuneler 14 mm çaplı dairesel kesitli çubuktan 3 mm kalınlığında kesilmiştir. Kesilmiş numunelerin yüzeyleri kesme işlemi neticesinde oluşması muhtemel oksit tabakasının kaldırılması amacıyla sırasıyla 80, 220, 400, 600, 800 ve 1200 numaralı silisyum karbür (SiC) zımparalarla ıslak olarak zımparalanmıştır.

2.2. Anodik Oksitleme (Anodizasyon)

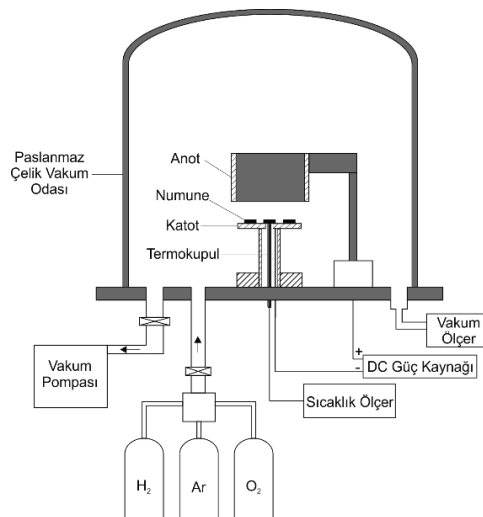
Anodik oksitleme, laboratuvar ortamında kurulmuş olan deney düzeneğinde yapılmıştır. Anodizasyon düzeneği, GPR-30H10D serisi 550Watt 50~60Hz doğru akım güç kaynağı, bir manyetik karıştırıcı ve oksidasyon işleminin yapıldığı kap içerisinde 100 ml beher ve karışımın homojen olmasını sağlamak amacıyla mıknatıs balıktan oluşmaktadır. Anodizasyon işleminde katot olarak paslanmaz çelik, anot olarak Ti6Al4V (Grade5) numunesi ve çözelti olarak 1.5M H₂SO₄ (saflığı %96) sülfürik asit kullanılmıştır (Taşdemir 2014). İşlem 100 V potansiyelde 10 dakika süre ile ve 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Anodizasyon deney düzeneği (Taşdemir 2014)

2.3. Plazma Oksitleme

Plazma oksitleme yüzey işlemi Şekil 2'de şematik resmi gösterilen ünite gerçekleştirilmiştir. Bu ünitenin temel elemanları, paslanmaz çelik vakum odası, vakum pompası, vakum ölçer, plazma ortamını oluşturacak olan gazlar, doğru akım (DC) güç ünitesi ve numune sıcaklığının okunmasını sağlayan K tipi Ni-Cr termokupludur.



Şekil 2. Plazma yüzey işlem ünitesinin şematik gösterimi (Bayrak 2013)

Numuneler, aynı zamanda sistemin katodu olan bir tutucu üzerine yerleştirilmiştir. Silindirik şekilli bir anot kullanılmakta olup, bu sayede numuneler plazma içerisinde homojen bir şekilde işlem görmektedir. Plazma ortamı Edwards RV12 vakum pompası vasıtasıyla 1×10^{-1} Pa basınca indirilmiştir. İşlem için gerekli olan enerji 1500 V gerilim kapasiteli doğru akım (DC) elektrik güç kaynağı tarafından sağlanmıştır. Gaz tüplerinin çıkışında bulunan iğne vanalar ile istenen orandaki gaz karışımı oluşturulmaktadır. Numune ile temas halindeki termokuplardan alınan sıcaklık bilgisi, bir elektronik sıcaklık ölçer ile okunmaktadır.

Hazırlanmış numuneler alkol ile temizlenip sıcak hava ile kurutulduktan sonra numune tutucu üzerine yerleştirilip ve vakum odası $2,5 \times 10^{-2}$ mbar (2,5 Pa) basınca kadar vakumlanmıştır. Yüzey işlemine başlamadan önce numuneler üzerinde bulunabilecek kirliliklerin giderilmesi amacıyla ortama H_2 gazı verilerek, 500 V gerilim altında, 15 dakika süre ile bir ön saçılma yapılmıştır. Yeniden vakum altına alınan sisteme %100 O_2 verilmiştir. Ortam basıncı iğne vanalar vasıtasıyla 5 mbar'a (5×10^2 Pa) sabitlenmiştir. Güç kaynağı açılarak elektriksel boşalma (glow discharge) gerçekleştirilmesi ile plazma ortamı oluşturulmuş, uygulanan gerilim ayarlanarak $650^\circ C$ sıcaklığa kadar numuneler ısıtılmıştır. Plazma oksitleme sisteminde herhangi bir ek ısıtıcı bulunmamaktadır. Hedeflenen sıcaklığa ulaşıldığında, oksitleme işlemi zamanı başlamış kabul edilmiştir. $650^\circ C$ sıcaklıkta 1 saat süre ile plazma ortamında oksitlenen numunelerin vakum ortamında yavaşça soğumaları sağlanmıştır.

2.4. Yapısal Analizler ve Yüzey Analizleri

İşlemsiz ve işlem görmüş numunelerin faz analizleri Panalytical Empyrean X-ışını kırınım ölçer (XRD) ve EDAX enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. XRD ölçümlerinde $\lambda = 1,54059 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip Cu-K α ışınımı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar The International Centre for Diffraction Data (ICDD) standart kartları ile karşılaştırılarak oluşan fazların kimyasal kompozisyonları tespit edilmiştir.

Numunelerin içyapısı, oksitleme işlemi, aşınma testleri sonrası yüzey görünüşleri ve yüzeyde oluşan oksit tabakasının kalınlığı taramalı elektron mikroskobu (SEM), FEI Quanta EFG 450 ve işlem öncesinde ve sonrasındaki yüzey pürüzlülüğü değişimleri Qualitest AFM cihazı kullanılarak incelenmiştir.

Yüzey sertliklerinin elde edilmesi amacıyla Bruker UMT 2 mikro sertlik cihazı kullanılmıştır. Vickers mikro sertlik ölçümleri yüzeyler için 25 gr yük altında 10 s yüklenme süresinde gerçekleştirilmiştir. Her bir numuneden birbirini etkilemeyecek mesafede en az beş ölçüm yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır.

2.5. Tribolojik Deneyler

İki farklı oksitleme işlemine tabi tutulmuş ve işlemsiz malzemelerin tribolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla uygulanacak deneyler Turkey PODWT&RWT aşınma cihazında 1 ve 2 N'luk normal yükler altında oda şartlarında doğrusal zıt yönlü düzlem-pim aşınma (reciprocating ball-on-flat) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma pimi olarak 6 mm çaplı yüksek sertliğe sahip WC-Co top kullanılmıştır. Sürtünme kuvveti bilgisayar tarafından aşınma cihazındaki yük hücresi (loadcell) ile sürekli olarak kaydedilmiştir. Aşınma deneylerine ait diğer şartlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Aşınma deney şartları

Normal Yük (N)	1 ve 2
Aşınma izi uzunluğu (mm)	15
Aşındırma süresi (s)	4500
Aşındırma mesafesi (m)	67,5
Bağlı Nem (%)	45 \pm 5
Sıcaklık ($^\circ C$)	20 \pm 2

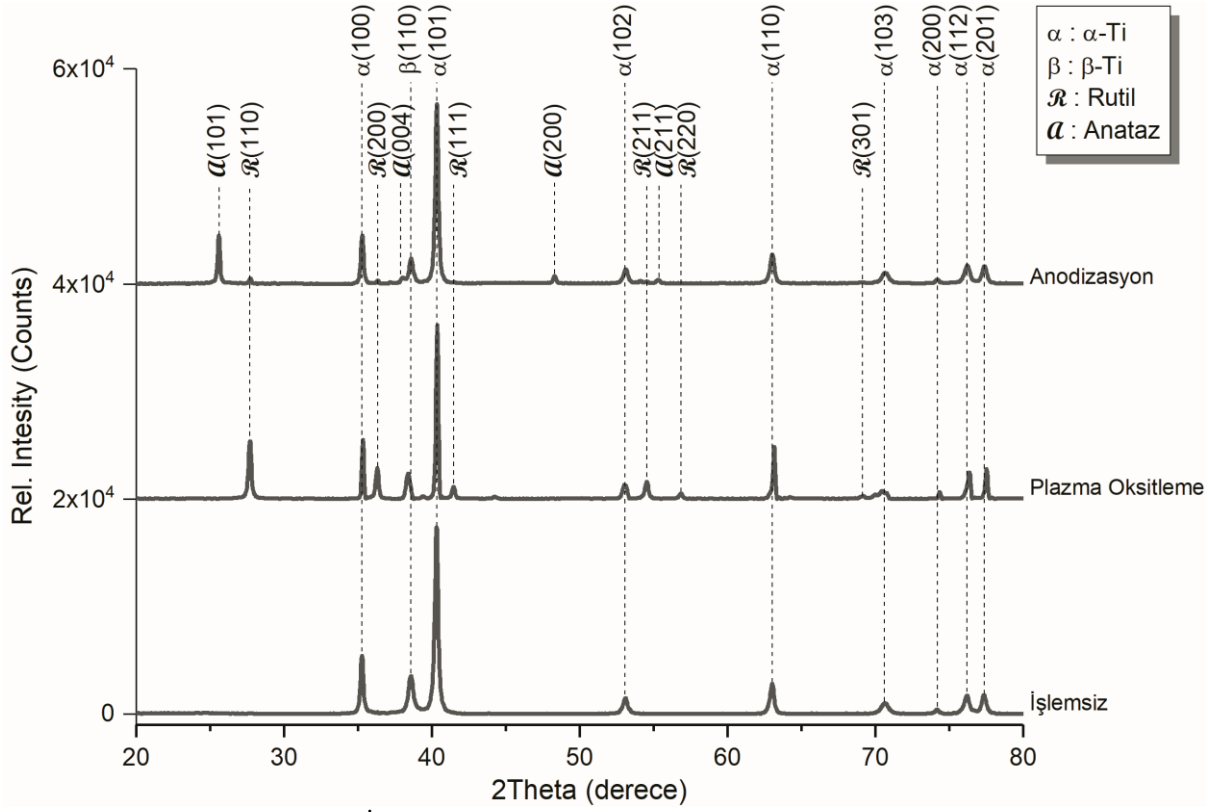
Yapılan testler sonunda her bir numunede meydana gelen aşınma miktarının hesaplanmasında aşağıdaki denklemde verilen ve Archard aşınma eşitliği olarak bilinen bağıntıdan yararlanılmıştır.

$$k = \frac{Q}{WL} \quad (1)$$

Burada Q kaybedilen toplam malzeme hacmini (mm^3), L toplam kayma mesafesini (m) ve W uygulanan normal yükü (N) göstermektedir. k değeri ise aşınma oranını (mm^3/Nm) ifade etmektedir. Kaybedilen toplam malzeme hacminin hesaplanabilmesi için aşınma numuneleri optik profilometre (Nanofocus, Germany) ile taranmıştır.

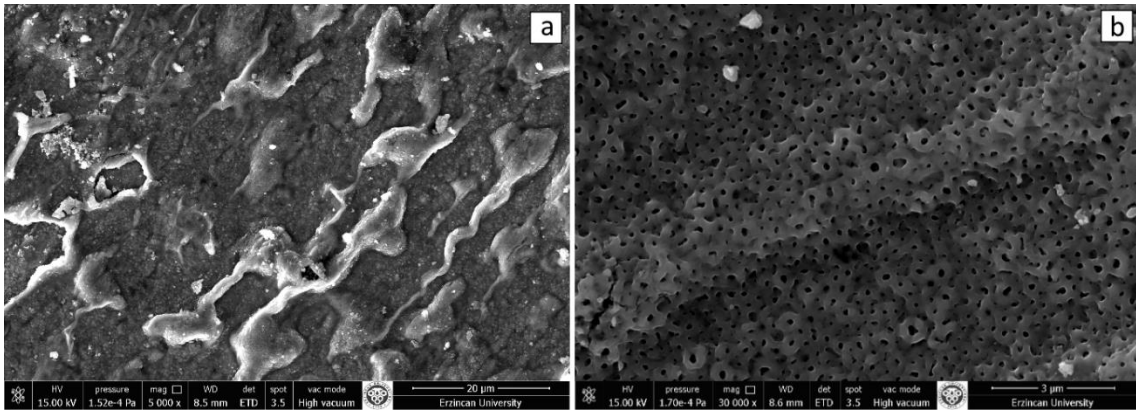
3. Bulgular ve Tartışma

İşlemsiz ve yüzey işlemine tabi tutulan numunelerin XRD sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Ti6Al4V malzemesinin $\alpha + \beta$ alaşımı olduğu için beklendiği gibi hegzagonal alfa ve kübik beta yapılardan meydana geldiği görülmektedir. Plazma oksidasyon işleminden sonra, yüzeyde kaya tuzu kristal yapısına sahip olan bir Rutil TiO_2 oluştuğu görülmektedir. Bununla birlikte, anodizasyon işlemi neticesinde yüzeyde oluşan TiO_2 fazının Anataz olduğu tespit edilmiş, sınırlı miktarda Rutil fazı yansımaları da görülmüştür.



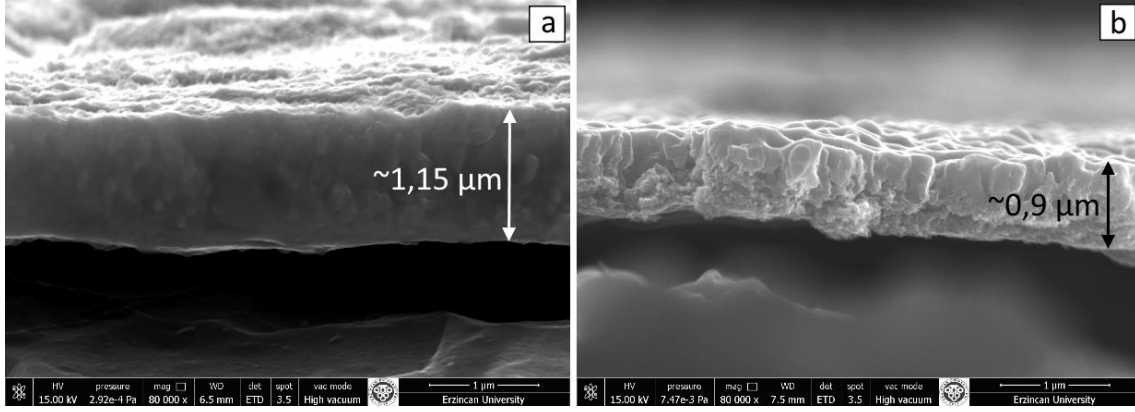
Şekil 3. İşlemsiz ve oksitlenmiş malzemelerin XRD sonuçları

Şekil 4 plazma ve anodizasyon işlemlerinden sonra numunelerin yüzey SEM görüntülerini göstermektedir. Plazma oksidasyondan elde edilen oksit tabakası (Şekil 4.a) oldukça yoğun bir yapıdadır. Bununla birlikte, plazma işlemi esnasında meydana gelen iyon bombardımanı, saçılma ve yeniden birikme süreçleri nedeniyle yüzeyde pürüzlerin meydana geldiği görülmektedir. Anodizasyon neticesinde elde edilen oksit tabakasının ise daha gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Gözeneklerin ortalama çapı yaklaşık 180 nm olarak ölçülmüştür.



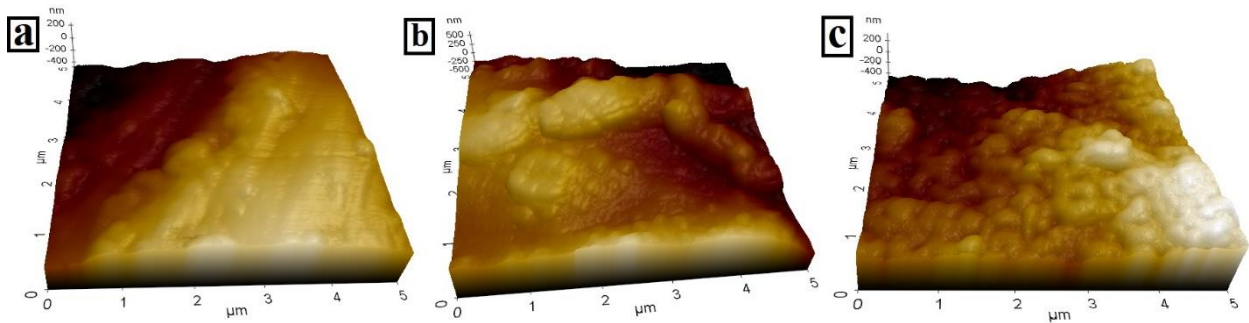
Şekil 4. Plazma (a) ve anodizasyon (b) ile oksitlenmiş yüzeylerin SEM görüntüleri

Şekil 5'te plazma ve anodizasyon yüzey işlemleri neticesinde elde edilen oksit tabakalarının kesit mikroyapısı gösterilmiştir. Ortalama olarak oksit tabakası kalınlığı değerleri plazma ve anodizasyon numuneleri için sırasıyla 1,15 µm ve 0,9 µm olarak ölçülmüştür. Tabaka ve taban malzeme arasında daha iyi görüntü alabilmek için kesitte Kroll reaktifi kullanılarak kimyasal dağlama işlemi yapılmış ve bu işleme bağlı olarak oksit tabakalarının yüzeylerden ayrıldığı gözlenmiştir.



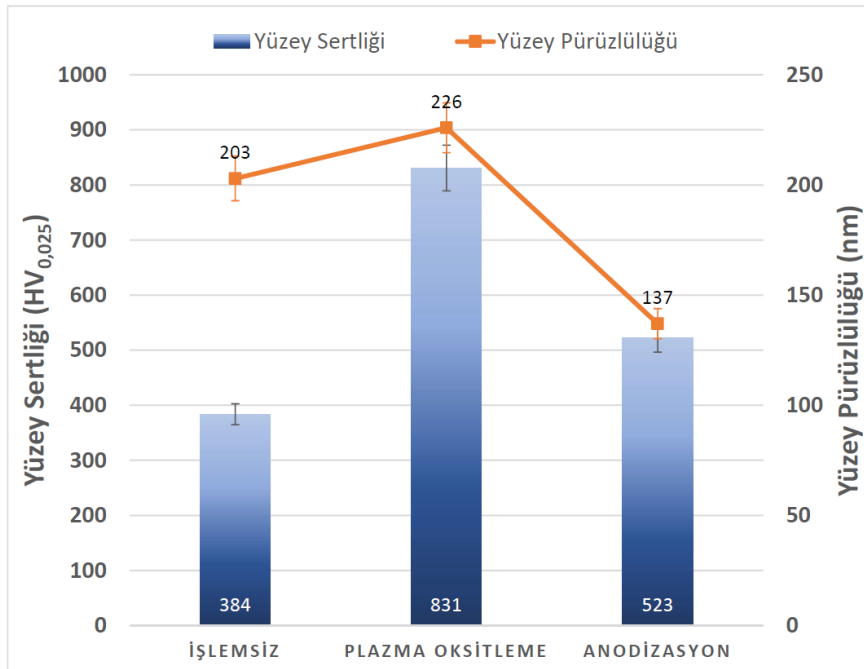
Şekil 5. Plazma (a) ve anodizasyon (b) işlemleri sonrası kesit SEM görüntüleri

İşlemsiz, plazma oksitleme ve anodizasyon işlemleri görmüş numunelerin AFM yüzey görüntüleri Şekil 6’da verilmiştir. Bu görüntüler SEM görüntülerinden elde edilenler benzer sonuçları ortaya koymaktadır. AFM görüntülerine dayanarak, ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) Şekil 7’de verilmiştir.



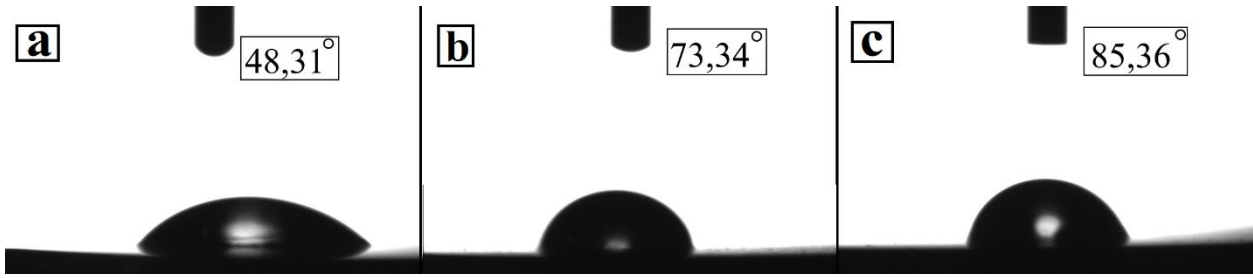
Şekil 6. İşlemsiz (a), plazma (b) ve anodik (c) oksitlenmiş yüzeylerin AFM görüntüleri

Yüzeylerin mikro sertlik değerleri yüzey pürüzlülüğü ile karşılaştırmalı olarak Şekil 7’de verilmiş olup, yüzey sertliğinin her iki oksidasyon işlemi ile birlikte arttığı görülmektedir. Mikro sertlikteki artışın plazma oksidasyon işlemi için yaklaşık %116 ve anodizasyon işlemi için yaklaşık %36 olduğu tespit edilmiştir. Mekanik yüzey hazırlama işlemi neticesinde işlemsiz numune için 203 nm olan yüzey pürüzlülüğü değerinin plazma oksidasyon işlemi sırasında meydana gelen iyon bombardımanı, yüzey atomlarının saçılması ve yeniden yüzeye dönmesi mekanizmaları neticesinde yaklaşık %11 kadar arttığı görülmektedir. Anodizasyon işleminde ise, yüzeyde oluşan oksit tabakasının mekanik hazırlık neticesinde yüzeyde kalan çukur bölgeleri doldurması suretiyle yüzey pürüzlülüğünde yaklaşık %33 oranında azalma tespit edilmiştir. Anodizasyon işleminin belirli koşullarda yüzey pürüzlülüğünü azalttığı bilimsel literatürde de rapor edilmiştir (B. Li et al., 2016).



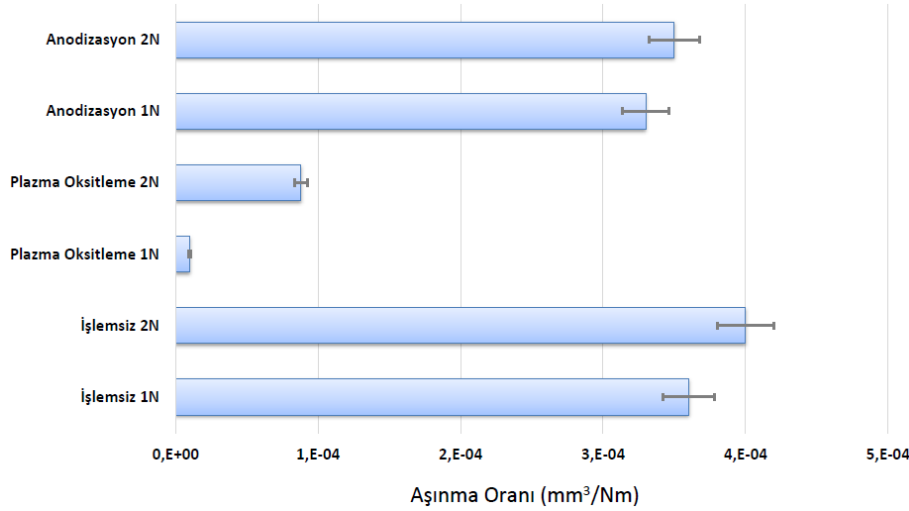
Şekil 7. İşlemsiz ve oksitlenmiş yüzeylerin mikro sertlik ve pürüzlülük değerleri

Temas açısı ölçümü sonuçları Şekil 8'de verilmiştir. Her iki oksitleme işleminin de daha az hidrofilik özellik gösteren yüzeyler elde edilmesini sağladığı açıkça görülmektedir. İşlemsiz numunenin temas açısı $48,31^\circ$ iken, plazma oksitleme yapılan yüzeylerde bu değer $73,34^\circ$ olarak değişmiştir. Diğer taraftan anodizasyon işlemi görmüş numunenin temas açısı $85,36^\circ$ olup, anodizasyon işlemi en az hidrofilik olan yüzeyi oluşturmuştur.



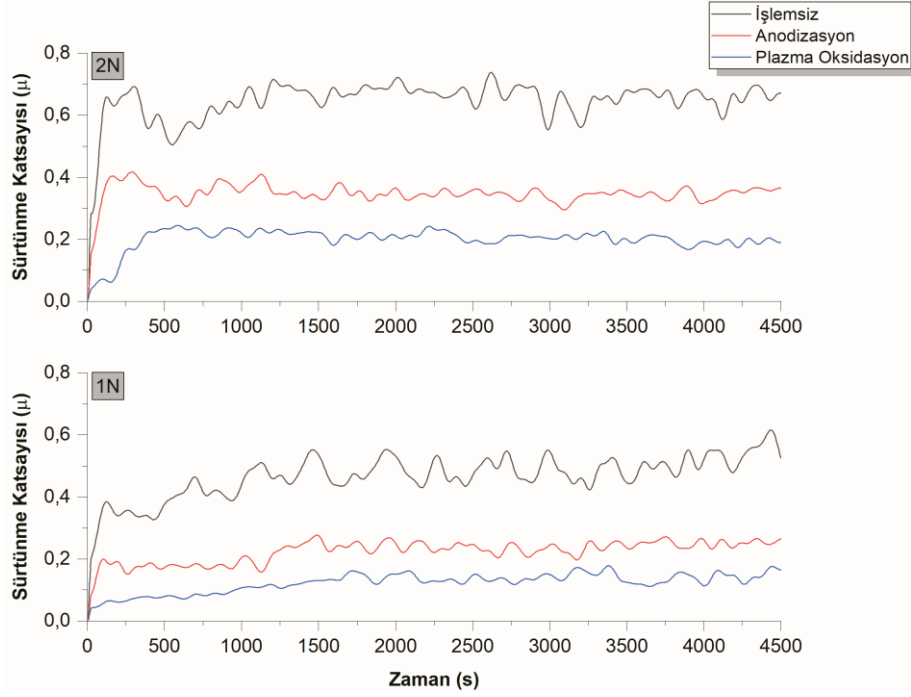
Şekil 8. İşlemsiz (a), plazma (b) ve anodik (c) oksitlenmiş yüzeylerin temas açısı profilleri

1 N ve 2 N normal yük kullanılarak gerçekleştirilen aşınma deneyleri neticesinde hesaplanan aşınma oranları Şekil 9'da gösterilmiştir. Buna göre yükten bağımsız olarak en büyük aşınma oranları işlemsiz numunelere aittir. 1 N yük altında en küçük aşınma oranı plazma oksitleme işlemine tabi tutulmuş numunede elde edilmiştir. Yüzeydeki rutil yoğunluklu sert ve kararlı oksit tabakasının numunenin aşınmasını büyük oranda engelleyebildiği görülmektedir. Bu numunede 2 N yük altında aşınma oranı artmış olmakla birlikte yine de işlemsiz ve anodizasyon uygulanmış numunelere nazaran oldukça küçüktür. Bu durumun başlıca nedeninin oksit tabakası altında var olduğu bilinen difüzyon bölgesi olduğu düşünülmektedir. Bu bölge yük karşılayabilen yapısı sayesinde yüzeydeki oksit tabakasının şekil değiştirmesini ve dolayısıyla kırılmasını geciktirici bir rol oynamıştır (Bayrak, 2013; Wierzchoń et al., 2015; Yetim et al., 2009). Anodizasyon işlemi uygulanan numunelerde yüzeydeki oksit yapısı sayesinde aşınma oranı işlemsiz numunelere göre bir miktar azalmıştır. Ancak tabakanın ince ve gözenekli olmasından kaynaklanan kırılabilir yapı nedeniyle bu azalmanın sınırlı kaldığı ve farklı yüklerde de benzer sonuçlar alındığı görülmektedir. Ayrıca tabaka altında herhangi bir difüzyon bölgesi olmaması da elde edilen sonuçlarda etkilidir.



Şekil 9. İşlemsiz ve oksitlenmiş numunelerin aşınma oranları

Yapılan aşınma deneyleri boyunca kaydedilen sürtünme katsayısı değerleri Şekil 10'da verilmiştir. Buna göre, yükten bağımsız olarak işlemsiz numune oksitlenmiş yüzeylere nazaran daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Plazma oksitleme işlemi ile en düşük sürtünme katsayısına sahip yüzeylerin elde edildiği görülmektedir. Deneyin başlangıç aşamasında düşük seyreden sürtünme katsayıları belirli bir noktadan sonra kararlı bir hale gelmiştir. Grafiklerde görülen salınımlar ise yüzeyden ayrılan aşınma partiküllerinin pim ile yüzey arasına sıkışması neticesiyle oluşmaktadır. Bu salınım işlemsiz numunelerde daha belirgindir. 1N'lük normal yük altında işlemsiz numunede 500 saniye kadar düşük seyreden sürtünme katsayısının bu noktadan sonra arttığı ve deney sonuna kadar salınımlı olarak 0,4 seviyesinde devam ettiği görülmektedir. Bu süre, aşınma nedeniyle yüzeyde partiküllerin oluşması ve ayrılması için geçen süredir. Anodizasyon işlemi uygulanmış yüzeyde ise 1000 saniye kadar nispeten düşük ve kararlı bir seyir vardır. Bu noktadan itibaren yüzeydeki oksit tabakasının iyice aşındığı ve sürtünme katsayısının bir miktar daha artarak 0,2 seviyesine çıktığı söylenebilir. Plazma oksitlenmiş örnekte ise yaklaşık 1700 saniye boyunca düşük ve salınımsız seyreden bir bölge göze çarpmaktadır. Bu bölge, yüzeydeki tabakanın aşındığı kısımdır. Sonrasında 0,15 seviyesinde kararlı bir aşınma rejimi görülmektedir. 2 N'lük normal yük altında da benzer davranışlar görülmekte olup, işlemsiz numune 0,6 seviyesinde yüksek ve salınımlı bir sürtünme katsayısı grafiği vermektedir. Anodizasyon uygulanmış numunede tabaka aşınmasının deneyin başlamasından kısa bir süre sonra gerçekleşerek sürtünme katsayısının 0,35-0,4 aralığına oturduğu söylenebilir. Plazma oksitlenmiş numunede ise tabakanın aşınma süresinin 500 saniye civarında olduğu, sonrasında ise 0,2 seviyesinde kararlı duruma geldiği görülmektedir.

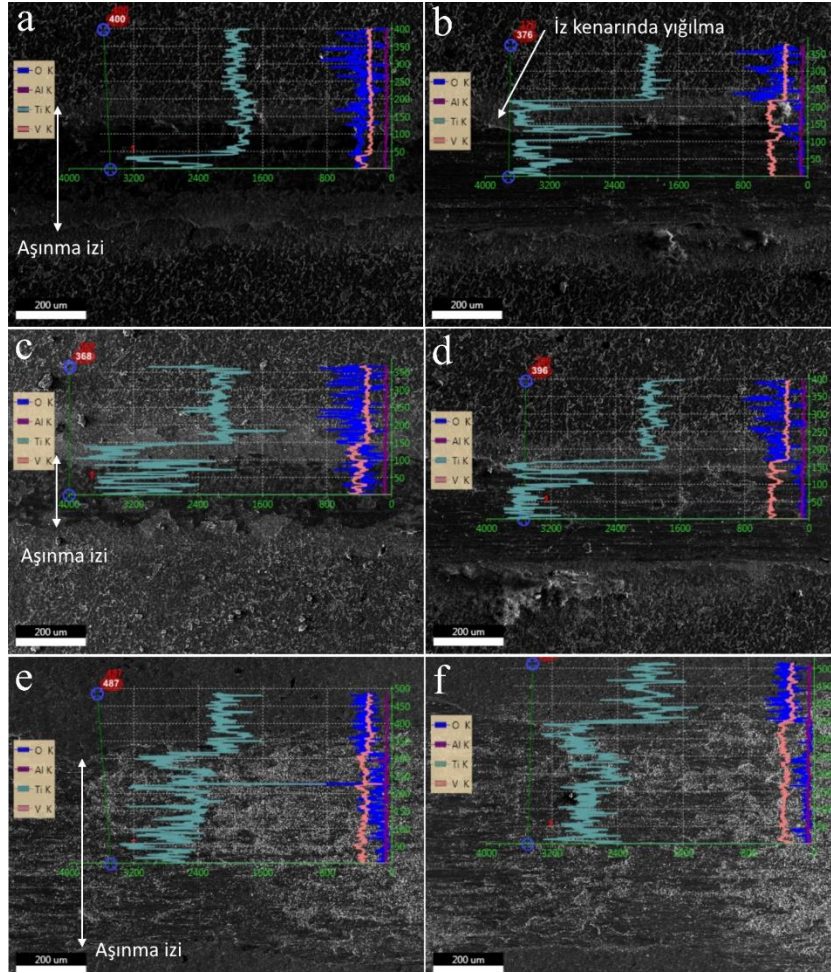


Şekil 10. İşlemsiz ve oksitlenmiş numunelerin aşınma esnasında kaydedilen sürtünme katsayıları

Şekil 11'de aşınma izi ve kenarlarından alınan çizgisel EDS sonuçları verilmiştir. Şekil 11a ve b'de anodizasyon işlemi uygulanmış numunenin sırasıyla 1 N ve 2 N'luk normal yük altındaki aşınma izleri görülmektedir. İz dışındaki yüzeyde oksijen miktarının yüksek oluşu oksit tabakası varlığını göstermektedir. İz içinde ise oksijen miktarı düşerek Ti ve V oranlarının arttığı görülmektedir. Bu durum, tabakanın aşınarak taban malzemeye inildiği veya çok yaklaştığı sonucunu göstermektedir. 2 N'luk yük altında gerçekleştirilen numunede aşınma izi kenarlarında aşınma ürünlerinin yığılması daha belirgin olup, element oranları itibarı ile 1 N'luk aşınma yüküne göre taban malzemeye tamamen inilmiş olduğu anlaşılmaktadır.

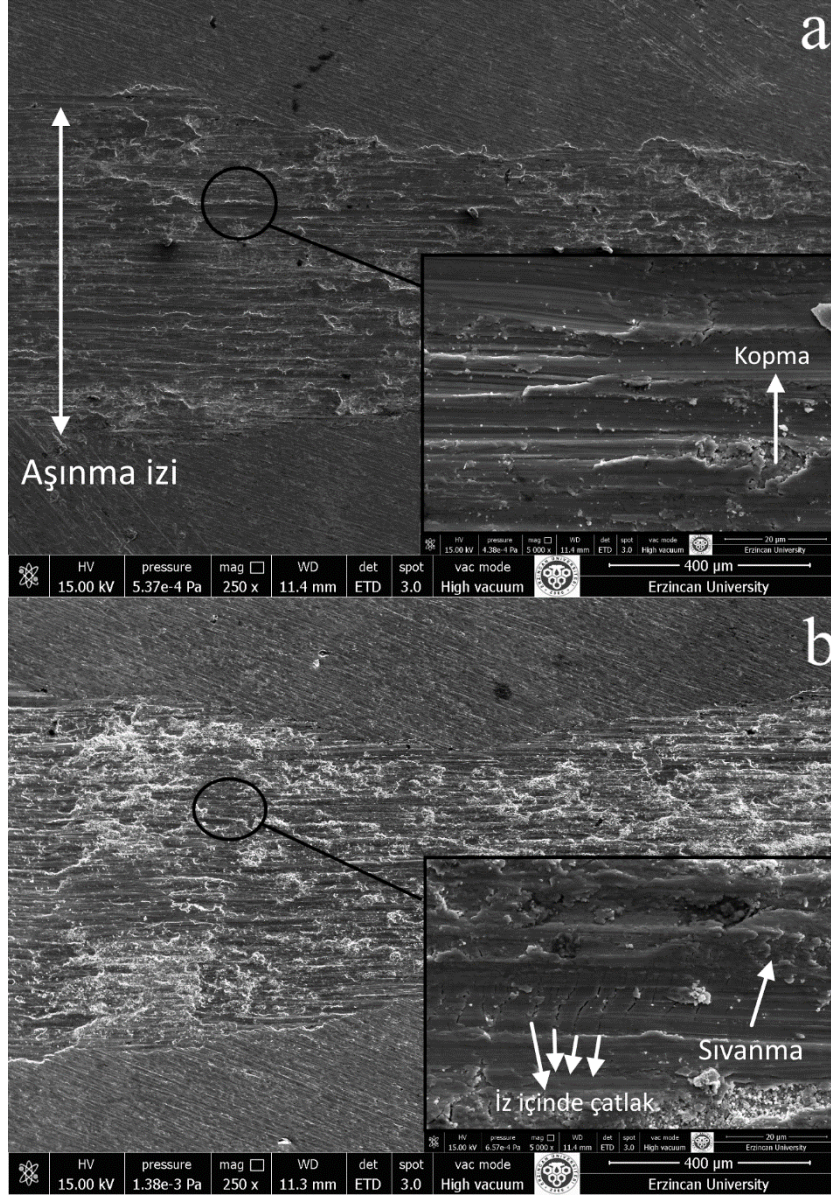
Şekil 11c ve d'de plazma oksitleme işlemi uygulanmış numunenin sırasıyla 1 N ve 2 N'luk normal yük altındaki aşınma izleri verilmiştir. Element oranların itibarı ile anodizasyon işlemine benzer değerler söz konusudur. Gerek 1 N ve gerekse 2N'luk yük altında tabakanın neredeyse tamamen aşınarak taban malzeme seviyesine inildiği veya çok yaklaştığı sonucuna varılabilir. Diğer taraftan bu işlemden görülen düşük aşınma oranı ve sürtünme katsayıları tabaka altındaki difüzyon bölgesinin varlığı neticesinde elde edilmiştir.

Şekil 11e ve f'de ise işlemsiz numuneye ait 1 N ve 2 N'luk normal yük altındaki aşınma izleri görülebilir. Elementel analiz sonuçları işlemsiz numune yüzeyinde bulunan doğal oksit tabakasına dair ipuçları sunmaktadır. Aşınma testi neticesinde bu tabaka da bozunmuştur ve aşınma izi içerisinde oksijen miktarının düşük ve Ti miktarının yüksek olduğu görülmektedir.



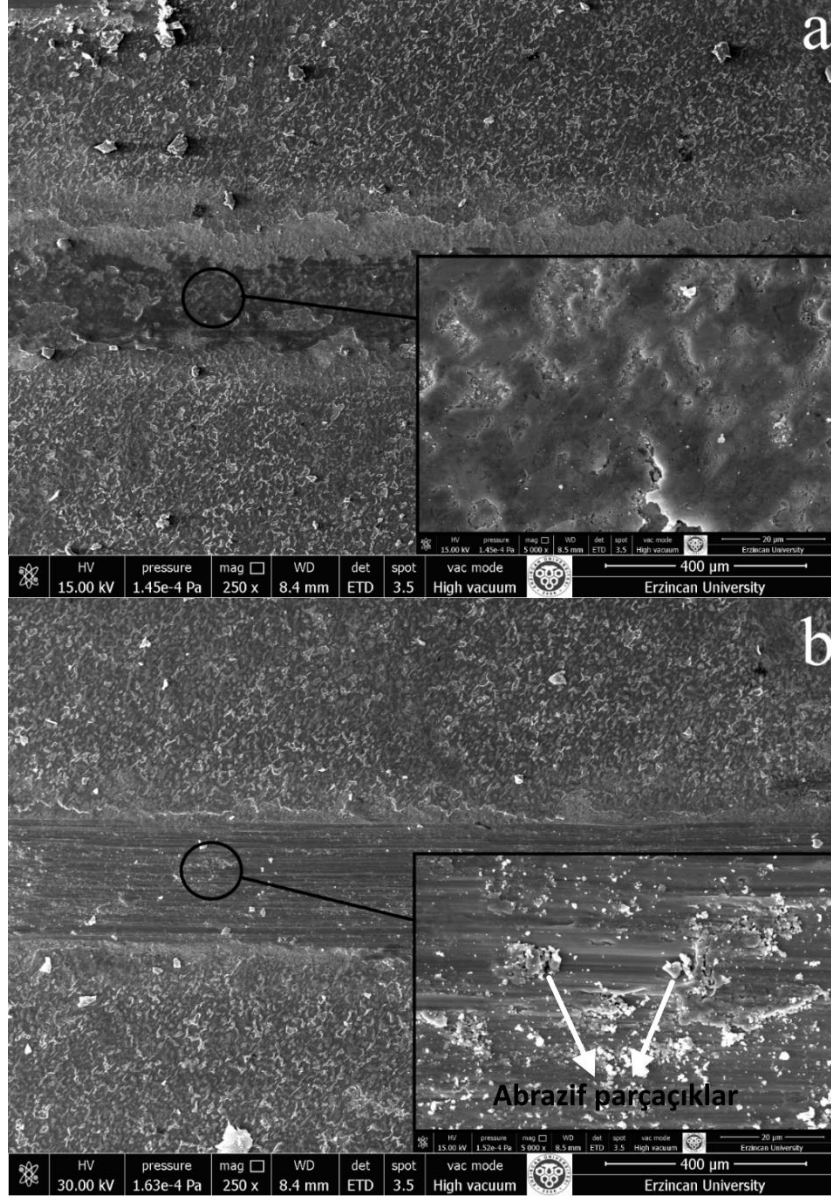
Şekil 11. Aşınma izi ve çevresinin çizgisel EDS analiz sonuçları: Anodizasyon 1N (a), Anodizasyon 2N (b), Plazma oksitleme 1N (c), Plazma oksitleme 2N (d), İşlemsiz 1N (e), İşlemsiz 2N (f)

Şekil 12a ve b’de sırasıyla işlemsiz numunenin 1 N ve 2N’luk normal yük altında gerçekleştirilen aşınma deneyi neticesinde elde edilen aşınma izleri verilmiştir. 1 N’luk normal yükte aşınma izi genişliği 500-600 μm aralığındadır. Aşınma izi içerisinde yüzey pürüzlerinin plastik deformasyonu neticesinde yüzeye sıvandığı klasik adeziv aşınma yapısı görülebilmektedir. Bu sıvanan tabakada yer yer kırılmalar da dikkat çekmektedir. Yüzeyden ayrılan bu parçalar malzeme ile pim arasında bir transfer filmi oluşturur ve bir süre aynı metalin (Ti) sürtünmesi söz konusu olur ancak pimden ayrılınca sürtünme katsayısında görülen salınımlara neden olurlar. 2 N’luk normal yük altında yapılmış deneyden alınan aşınma izi görüntüsüne bakıldığında aşınma izi genişliğinin benzer olduğu görülmektedir. Bununla birlikte iz içerisinde yüzeye sıvanan tabakalar ve bu tabakaların pimin hareket yönüne göre arkasında meydana gelen yüksek çekme gerilmeleri nedeniyle çatlaması daha belirgin olarak görülebilmektedir. Ayrıca pime sıvanan ve sonrasında ayrılan aşınma parçacıklarının sürtünmenin ortaya çıkardığı sıcaklık nedeniyle oksitlenerek sert partiküller oluşturduğu ve aşınmada üçüncü cisim olarak davranmaya başladığı dikkat çekicidir. Bu nedenle aşınma davranışının abrazyona dönüşmeye başladığı söylenebilir.



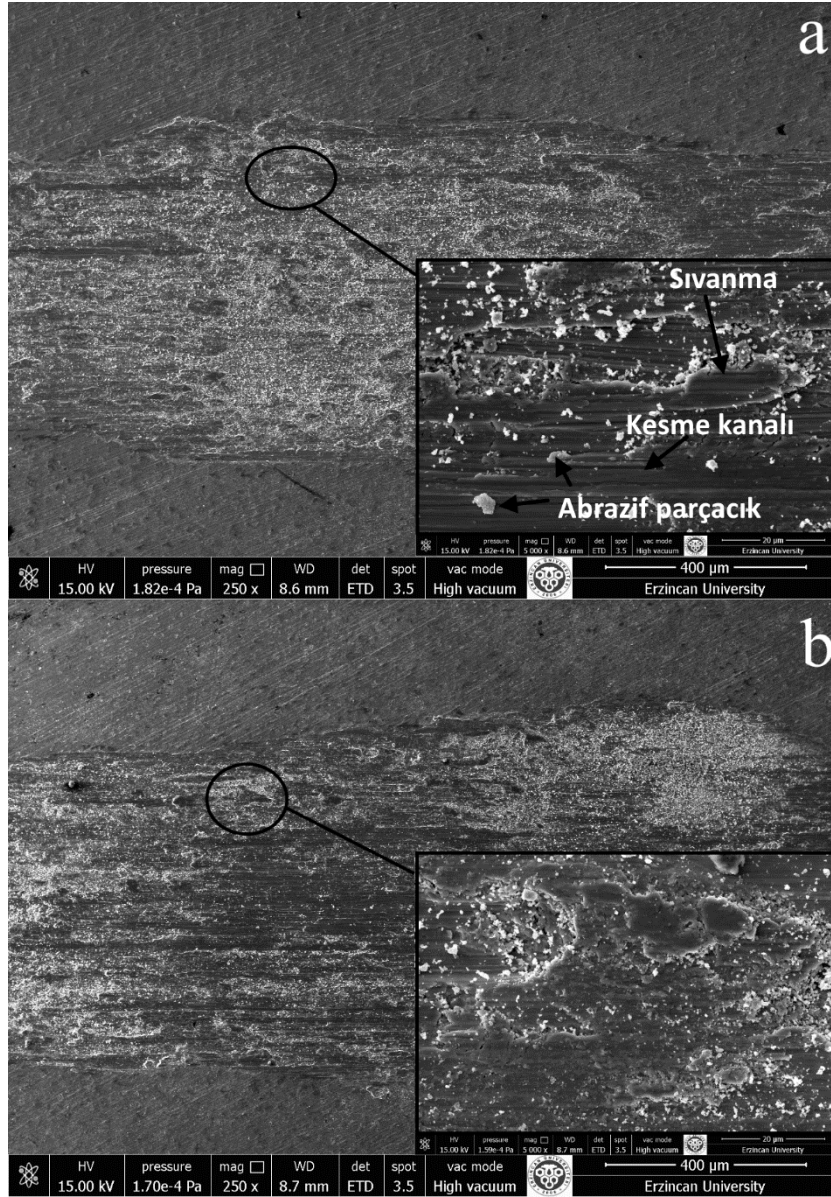
Şekil 12. İşlemsiz numuneye ait 1 N (a) ve 2 N (b) normal yük altında aşınma izleri.

Plazma oksitlenmiş numunelerin 1 N ve 2N'luk normal yük altında yapılan aşınma deneyi aşınma izleri sırasıyla Şekil 13a ve Şekil 13b'de verilmiştir. 1 N'luk yük altında aşınma izi genişliği yaklaşık 250 μm civarındadır ve ağırlıklı olarak yüzey pürüzlerinin plastik deformasyonu ile adezif aşınma söz konusudur. Tabakanın yer yer kırıldığı ancak abradif aşınmaya neden olacak kadar partikül açığa çıkmadığı, ayrıca transfer filmi oluşmadığı görülmektedir. 2 N'luk normal yük altında ise aşınma izi genişliği yaklaşık 300 μm olmuştur. İz içerisinde, yüzey tabakasının kırıldığı ve abradif aşınmaya neden olabilecek üçüncü cisimler oluşturduğu görülmektedir. Bu parçacıkların önünde sıkışan malzemenin yığılmalar oluşturduğu da tespit edilmiştir. Diğer bir ifade ile yükün artması ile aşınma karakteristiği değişim göstermeye başlamıştır.



Şekil 13. Plazma oksitlenmiş numuneye ait 1 N (a) ve 2 N (b) normal yük altında aşınma izleri.

Şekil 14a ve Şekil 14b’de 1 N ve 2N’luk normal yük altında yapılan aşınma deneyi aşınma izleri anodik oksitleme işlemi yapılmış numuneler için verilmiş olup, aşınma izi genişliği her iki yük için de yaklaşık 600 µm civarındadır. 1N’luk normal yükte tabakanın kırılarak üçüncü cisimler teşkil ettiği yani aşınmanın abrazif nitelikte olduğu söylenebilir. Bu parçacıkların pimin hareketi ile yüzeyde hareket yönünde kesme kanalları oluşturduğu da görülebilmektedir. 2 N’luk yük altında ise aşınma yine klasik abrazif özelliktedir. İz içinde yer yer çatlak ve ayrılmalar görülmekte olup, yüzey tabakasının neredeyse tamamen aşınmış olduğu söylenebilir.



Şekil 14. Anodik oksitlenmiş numuneye ait 1 N (a) ve 2 N (b) normal yük altında aşınma izleri.

4. Sonuçlar

Çalışmada, Ti6Al4V alaşımı, 650°C sıcaklıkta %100 O₂ atmosferinde 1 saat süre ile plazma oksitleme ve 1,5M H₂SO₄ çözeltisinde 100V gerilim altında 25°C sıcaklıkta 10 dakika süre ile anodik oksitleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen yüzey oksit tabakaları plazma oksitleme işleminde yoğun ve homojen rutil-TiO₂ fazı ağırlıklı iken, anodizasyon işleminde yüksek poroziteli anataz-TiO₂ fazı ağırlıklıdır. Her iki oksitleme işlemi de yüzey sertliğini arttırmış olmakla birlikte sertlikteki artış plazma oksitleme işleminde tabaka altında meydana gelen difüzyon bölgesinin etkisi ile çok daha yüksek olmuştur. Plazma oksitleme işlemi, işlem esnasında plazma ortamında gerçekleşen etkileşimler neticesinde yüzey pürüzlülüğünü arttırmış, anodizasyon işlemi ise işlemsiz yüzeyde bulunan pürüzlerin arasını doldurmak sureti ile pürüzlülüğü azaltıcı yönde etki göstermiştir. Her iki yüzey oksit tabakasının da daha hidrofobik yapıda olduğu ancak anodizasyon ile elde edilen tabakada bu etkinin bir miktar daha fazla olduğu görülmektedir. Yüzey işlemleri neticesinde alaşımın sürtünme katsayısı ve aşınma oranını içeren tribolojik performansında iyileşme kaydedilmiştir. Bu iyileşmenin ise sertliği daha yüksek olan plazma oksitleme işlemi ile edilen yüzeyde daha belirgin olduğu anlaşılmıştır. Sonuç olarak Ti6Al4V alaşımından üretilen implantlarda görülebilen aşınma probleminin anodizasyon ve plazma oksitleme yüzey işlemleri ile daha sert ve kimyasal olarak kararlı yüzeyler elde edilmek sureti ile oldukça düşük seviyeye indirilmesi mümkündür. Bu yüzeylerin biyolojik cevaplarının ise ayrıca incelenmesi gerekmektedir.

Teşekkürler

Bu çalışma kısmi olarak Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: FBA-2018-547



Referanslar

- Balazic, M., Kopac, J., Jackson, M. J., & Ahmed, W. (2007). Review : titanium and titanium alloy applications in medicine. *International Journal of Nano and Biomaterials*, 1(1), 3–34.
- Bayrak, Ö. (2013). *Plazma Oksitleme İşleminin Ti6Al7Nb ve Ti45Nb Alaşımlarının Tribolojik, Elektrokimyasal ve Biyouyumluluk Özelliklerine Etkisi*. Atatürk Üniversitesi.
- Dong, H., & Bell, T. (2000). Enhanced wear resistance of titanium surfaces by a new thermal oxidation treatment. *Wear*, 238(2), 131–137. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00359-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00359-2)
- Fu, Y., & Batchelor, A. W. (1998). Laser nitriding of pure titanium with Ni, Cr for improved wear performance. *Wear*, 214(1), 83–90. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00204-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00204-4)
- Januszewicz, B., & Siniarski, D. (2006). The glow discharge plasma influence on the oxide layer and diffusion zone formation during process of thermal oxidation of titanium and its alloys. *Vacuum*, 81(3), 215–220. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2006.03.008>
- Kuroda, D., Niinomi, M., Morinaga, M., Kato, Y., & Yashiro, T. (1998). Design and mechanical properties of new β type titanium alloys for implant materials. *Materials Science and Engineering: A*, 243(1–2), 244–249. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00808-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00808-3)
- Li, B., Li, J., Liang, C., Li, H., Guo, L., Liu, S., & Wang, H. (2016). Surface Roughness and Hydrophilicity of Titanium after Anodic Oxidation. *Rare Metal Materials and Engineering*, 45(4), 858–862. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(16\)30088-1](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(16)30088-1)
- Li, Y., Wong, C., Xiong, J., Hodgson, P., & Wen, C. (2010). Cytotoxicity of Titanium and Titanium Alloying Elements. *Journal of Dental Research*, 89(5), 493–497. <https://doi.org/10.1177/0022034510363675>
- Lu, J., Zhang, Y., Huo, W., Zhang, W., Zhao, Y., & Zhang, Y. (2018). Electrochemical corrosion characteristics and biocompatibility of nanostructured titanium for implants. *Applied Surface Science*, 434, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.168>
- Meichsner, J., Schmidt, M., Schneider, R., & Wagner, H. E. (2012). *Nonthermal Plasma Chemistry and Physics*. Retrieved from <https://books.google.com.tr/books?id=ckZ3V6Ss32sC>
- Park, J., & Lakes, R. S. (2007). *Biomaterials*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-37880-0>
- Runa, M. J., Mathew, M. T., & Rocha, L. A. (2013). Tribocorrosion response of the Ti6Al4V alloys commonly used in femoral stems. *Tribology International*, 68, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.09.022>
- Stratton, P., & Graf, M. (2010). Wear of diffusion hardened Ti–6Al–4V sliding against tool steel. *Wear*, 268(3–4), 612–616. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.10.009>
- Strobel, M., Lyons, C. S., & Mittal, K. L. (1994). *Plasma Surface Modification of Polymers: Relevance to Adhesion*. Retrieved from <https://books.google.com.tr/books?id=P9er1ebJqhAC>
- Welsch, G., Boyer, R., & Collings, E. W. (1993). *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. In *Materials Properties Handbook*. Retrieved from <https://books.google.com.tr/books?id=x3rToHWocD8C>
- Wierzchoń, T., Czarnowska, E., Grzonka, J., Sowińska, A., Tarnowski, M., Kamiński, J., ... Kurzydłowski, K. J. (2015). Glow discharge assisted oxynitriding process of titanium for medical application. *Applied Surface Science*, 334, 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.08.071>
- Yetim, A. F., Yildiz, F., Vangolu, Y., Alsarar, A., & Celik, A. (2009). Several plasma diffusion processes for improving wear properties of Ti6Al4V alloy. *Wear*, 267(12), 2179–2185. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.04.005>
- Zieliński, A., Sobieszczyk, S., Seramak, T., Serbiński, W., Świczko-Żurek, B., & Ossowska, A. (2010). Biocompatibility and Bioactivity of Load-Bearing Metallic Implants. *Advances in Materials Sciences*, 10(4), 21–30. <https://doi.org/10.2478/v10077-010-0013-1>



Türkiye’de Otomotiv Yan Sanayinde Çevreci Tesis Yeri Seçimi Problemi

Green Facility Location Problem in The Automobile Supply Industry in Turkey

Mithat Alper Erşen^{1,2} , Çağrı Sel² 

¹Aygerson Aydınlatma Gereçleri, Saray, Bayraktar Cd. No:2, 06980 Kahramankazan/Ankara
²Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karabük Üniversitesi, 78050 Karabük, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 17/05/2019

Kabul / Accepted: 19/11/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Bu çalışmada otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın Türkiye'nin çeşitli illeri arasından uygun bayi yerlerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Karbon salınım miktarını ve taşımadan kaynaklanan maliyetleri en aza indirmek uygun bayi yerlerinin belirlenmesinde temel hedefdir. Bu amaçla literatürde yaygın olarak ele alınan p-medyan tesis yeri seçimi problemi araştırılmıştır. Ardından firmanın mevcut durumdaki bayi yerlerinin uygunluğunu değerlendirmek üzere bayilerin talep noktalarına olan uzaklıklarına bağlı olarak ortaya çıkacak uzaklıkları hesaplanmıştır. Açılması düşünülen yeni bayilerden talep noktalarına olan taşıma kaynaklı çıkan karbon salınımı miktarları hesaplanmıştır. Uzaklıklar ve karbon salınım miktarları bir matematiksel model ile değerlendirilerek, firmaya çevresel duyarlılığı dikkate alan tesis yeri önerilerinde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler

“p-medyan, çevreci tesis yeri seçimi, karbon salınımı, otomotiv sektörü”

Abstract

In this study, we determine vendor locations of a company operating in the automotive sector among the various locations in Turkey. We aim to minimize carbon emissions and transportation costs in this problem. Therefore, we review the p-median facility location problem in the literature. We evaluate the existing vendor locations and distances between the demand points and, the amount of carbon emissions arising from the transportation activities of potential vendors to the demand points. We evaluate the distances and carbon emission using a mathematical model and suggest the facility locations accounting for environmental concerns.

Key Words

“p-median, green facility location, carbon emissions, automobile industry”

1. Giriş

Mal ya da hizmet üretimi amacı ile var olan işletmelerin tedarik, üretim, depolama ve dağıtım gibi temel fonksiyonlarını ekonomik amaçlarına uygun olarak gerçekleştirebilecekleri en uygun coğrafi alan tesis yeri olarak adlandırılmaktadır (İlhan ve Burdurlu, 1993). Uygun tesis yeri temel amacı büyümek ve fayda yaratmak olan işletmelerin, kurulduktan sonra düşük maliyetlerle yüksek karlılığın elde edilmesini sağlayan üretim ve taşıma faaliyetlerinin gerçekleştirildiği yerdir (Aytekin ve Kaygın, 2005).

Günümüz iş dünyasında işletmelerin varlıklarını sürdürebilmeleri, iç ve dış pazarlarda rekabet güçlerini arttırarak karlılıklarında sürekli yükseliş eğilimi yakalayabilmeleri için etkin bir tedarik zinciri yönetimi stratejisi uygulamaları gerekmektedir. Firmaların enerji, bakım-onarım, depolama, üretim gibi temel maliyetleri arasında yer alan taşıma ve depolama faaliyetlerinden doğan lojistik maliyetleri genel giderlerinin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu maliyetler göz önüne alındığında firmalar için açılması düşünülen yeni tesislerin (bayilerin) yerlerinin doğru seçimi önem arz etmektedir.

Son yıllarda ilgi uyandıran ve üzerine çalışmalar yapılan, karbon ayak izi, yeşil tesisler kurulması ve yeşil tedarik zinciri tasarımı konuları doğaya en az tahribat verilmesi açısından önemli bir noktaya gelmiştir. İşletmelerin faaliyetlerini ve çevresel kaygılara dikkate alıp almadıklarını yakından takip eden müşteriler bu konulara verilen önemin her geçen gün artmasına katkı sağlamaktadırlar.

Bu çalışma Ankara'da bulunan ve otomotiv aydınlatma sektöründe faaliyet gösteren, araç içi ve araç dışı aydınlatma ürünleri (far, stop lambası vb.) üreten, Aygersan A.Ş.'nin ürünlerinin bayilerine taşınması faaliyeti esnasında ortaya çıkan taşımacılık maliyetlerini ve karbon salınım oranlarını göz önüne alan, müşteri ihtiyaçlarını en iyi şekilde karşılamayı hedefleyen bir matematiksel model ele alınmıştır. Bu model toplam maliyetten ziyade karbon emisyonunu dikkate alan bir amaç fonksiyonu ile çözülmüş ve firma için uygun tesis yerleri belirtilmiştir.

Takip eden bölümlerde; literatürde yer alan tesis yeri seçimi üzerine yapılmış araştırmalar incelenmiştir, çalışmada ele alınan çevreci tesis yeri seçimi problemi ve kullanılan matematiksel model tarif edilmiştir, endüstriyel uygulama anlatılarak elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

2. Literatür Taraması

Tesis yeri seçimi problemleri konusunda literatürde birçok teorik ve uygulamalı çalışma bulunmaktadır. Bu konuyla ilgili yapılan bazı çalışmalar Tablo 1'de gösterilmiştir. Tabloda p-medyan problemine ilişkin bu çalışmalarda hangi konuların üzerinde durulduğu, hangi yöntemler kullanıldığı incelenmektedir.

Caccetta ve Dzator (2005) acil servislerin yer seçimi problemine çözüm geliştirmişlerdir. Çalışmalarında üç sezgisel metot ortaya koyup, en iyi çözüme en çok yaklaşan metodu kullanarak ideal tesis yeri seçimi yapmışlardır. Benzer şekilde, Ruslim ve Ghani (2006) de acil servis yeri seçimi problemini ele almışlardır. Çalışmalarında ortaya koydukları modelin çözümü için Microsoft Excel Solver programı kullanılmıştır ve optimum tesis yeri belirlenmiştir. Özdağoğlu (2010) unlu mamul üretimi yapan bir firmanın açacağı yeni tesis için en uygun yerin belirlenmesi amacıyla klasik analitik hiyerarşi prosesi ve bulanık analitik hiyerarşi prosesi yöntemlerini uygulayarak, bu iki yöntemin verdiği sonuçları kıyaslamıştır. Uygun tesis yerine bulanık analitik hiyerarşi prosesi yöntemi ile ulaşıldığı vurgulanmıştır. Yılmaz vd. (2011) hızlı tüketim malları için en uygun depo yerinin seçimi ile ilgilenmiştir. Çözüm için bir genetik algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma MS SQL Server veri tabanı sunucusu ve .NET Framework 3.5 Visual Studio 2008 IDE kullanılarak düzenlenmiştir. Çalışma neticesinde 36 adet tesisin açıldığı uygun bir çözüme ulaşılmıştır. Fo ve da Silma Mota (2012) Brezilya'da açılması planlanan sağlık tesislerinin yerlerinin seçimi için p-medyan yöntemini kullanmıştır ve taşıma maliyetini minimize eden en iyi yerin seçimini yapmıştır. Goetzing vd. (2012) tesis yeri seçiminde taşıma kaynaklı maliyetleri minimize etmeyi amaçlamıştır. GAMS programı ile ortaya koydukları modeli CPLEX MIP solver ile çözerek 5 iyi tesis yeri ortaya koymuşlardır. Kim ve Soh (2012) bir okula ait otobüslerin en az yolu kat edecek güzergahlarını tespit etmeye çalışmıştır. Kurulan model Microsoft Excel Solver programı ile çözümlenerek, alternatif güzergahlar arasından en kısa mesafeli taşımanın olduğu taşıma ağı ortaya koyulmuştur.

Ndiaye vd. (2012) en iyi okul yeri seçimi üzerine çalışmıştır. Çalışmada, bir karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir ve model IBM-CPLEX programı çözülmüştür. Özçakar ve Bastı (2012) tesis yeri seçimi problemi için bir parçacık sürü algoritması geliştirerek, elde ettikleri sonuçları literatürdeki farklı sezgisel ve meta sezgisel yöntemlerin sonuçlarıyla kıyaslamıştır. Geliştirilen sezgiselin Gamma sezgiseli dışındaki diğer yöntemlerden daha iyi sonuçlar verdiği vurgulanmıştır. Karabay vd. (2014) bir kamu kurumunun mevcut tesislerinin hangilerinin açık kalması hangilerinin kapatılması gerektiğini konu alan çalışmalarında stokastik çok kriterli kabul edilebilirlik analizi yöntemini uygulamıştır. Çalışma sonucunda 8 tesisin kapatılması gerektiği vurgulanmıştır. Soba vd. (2014) bulanık TOPSIS yöntemini kullanarak Uşak ilinde yeni bir alışveriş merkezinin kuruluş yerinin belirlenmesi üzerine çalışmıştır. Çalışmada alternatif yerlerin değerlendirilmesi ve kriterlerinin belirlenmesi için 6 karar vericinin görüşüne başvurulmuştur. Değerlendirme ve hesaplamalar sonucunda, Uşak ilinde İzmir yolu üzerine bir alışveriş merkezi kurulmasına karar verilmiştir. Gülsün ve Şahin (2017) çok kriterli karar verme yöntemlerinden Topsis ve Vikor ile Trakya Bölgesinde bir tesis yeri seçimi için potansiyel bölgeleri değerlendirmiştir. Karar verici olarak akademisyen, endüstri mühendisi ve sektörde çalışan yetkililerden oluşan bir grup oluşturulmuştur, 8 kriter ve 3 adet alternatif yer belirlenmiştir. Erdal (2018) yılında yaptığı çalışmada güvenlik güçleri tarafından kullanılan güvenlik malzemeleri deposunun yeniden konuşlandırılması için Analitik Hiyerarşi Süreci ve TOPSIS yöntemlerini bütünlük olarak uygulamıştır ve depo yeri

olarak Kırıkkale ilini belirlemiştir. Özcan vd. (2019) karlılık karşılaştırma ve Analitik Hiyerarşi Prosesi yöntemlerini kullanarak Moritanya'daki balıkçılık işletmeleri için en iyi yerin belirlenmesi üzerine çalışmıştır. En uygun tesis yerleri sırasıyla, Nouadhibou, Nouakchott ve Peka bölgeleri olarak tespit edilmiştir.

Literatürde yer alan bu çalışmalar göz önüne alındığında, tesis yeri seçimi problemlerinde taşıma kaynaklı maliyetlerin yanı sıra çevresel kaygıları da dikkate alan çalışmalara ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu çalışmada CO₂ salınımı ve kat edilen mesafe kaynaklı maliyetler göz önünde bulundurularak firmanın açmayı düşündüğü bayiler için en iyi tesis yeri ve sayısı belirlenmiştir. Bu açıdan çalışmanın çevresel kaygıları dikkate alan bir p-medyan problemini uygulamalı olarak ele alması ve sağladığı bilgisayar destekli karar verme kolaylığı ile literatüre ve sanayiye katkıda bulunulacağı düşünülmektedir.

Tablo 1. Tesis Yeri Seçimi Problemleri Literatür Araştırması

Yayın Yılı	Yazarlar	Konu	Yöntem
2005	Caccetta ve Dzator	Acil servis yeri seçimi	p-medyan
2006	Ruslim ve Ghani	Acil servis yeri seçimi	p-medyan
2010	Özdağoğlu	Unlu mamul üretimi yapan bir firmanın tesis yeri seçimi.	Bulanık analitik seçim süreci
2011	Yılmaz vd.	Hızlı tüketim malları depo yeri seçimi uygulaması	Genetik algoritma
2012	Fo ve da Silva Mota	Sağlık tesislerinin yer seçimi	p-medyan
2012	Goetzinger vd.	CO ₂ emisyonunu göz önüne alarak tesis yeri seçimi.	p-medyan
2012	Kim ve Soh	Okul otobüsü ağı tasarımı	p-medyan
2012	Ndiaye vd.	Okul yeri seçimi	p-medyan
2012	Özçakar ve Bastı	Tesis yeri seçimi uygulamaları	Parçacık sürüsü optimizasyonu
2014	Karabay vd.	Bir kamu kurumu için tesis yeri seçimi uygulaması.	Stokastik çok kriterli kabul edilebilirlik analizi
2014	Soba vd.	Uşak ilinde açılması planlanan AVM yeri seçimi	Bulanık Topsis
2017	Gülsün ve Şahin	Peyniraltı suyu üreten bir işletmenin tesis yeri seçimi	Topsis ve Vikor
2018	Erdal	Güvenlik malzemeleri depo yeri seçimi	Analitik Hiyerarşi Süreci(AHS) ve Topsis
2019	Özcan vd.	Moritanyadaki balıkçılık tesislerinin yer seçimi	Karlılık karşılaştırma ve Analitik Hiyerarşi Prosesi(AHP)

3. Problemin Tanımı ve Matematiksel Model

Bu çalışma otomotiv ve aydınlatma sektöründe faaliyet gösteren Aygersan A.Ş.'nin, Türkiye'nin çeşitli bölgelerindeki müşteri talep miktarının belli olduğu durumda bayi yerlerinin belirlenmesine odaklanmaktadır. Temel problem, bir ağda yer alan n adet nokta içerisinde en uygun p adedini toplam taşıma mesafesini ve CO₂ salınım miktarını düşürmek amacıyla en uygun bayi yerini seçmektir ve talep noktalarını kendilerine en yakın bayiden hizmet alacak şekilde atamaktır. Bu haliyle problemin literatürde yaygın olarak ele alınan p-medyan tesis yeri seçimi probleminin bir türevi olduğu belirtilebilir.

Şebeke ya da ağ adı verilen yapı üzerinde, n adet düğüm ya da noktanın olduğu varsayıldığında, bu n adet noktadan p adedinin tesis yeri olarak belirlenmesi ve geri kalan düğüm ya da talep noktaların hizmet almak için belirlenen tesislerden kendilerine en yakın olana atanması problemi bir p-medyan problemini ifade eder. Toplam ortalama ağırlıklandırılmış mesafenin minimum yapılmasıyla anlatılmak istenen, talep miktarlarının göz önünde bulundurularak tesis ile talep noktaları arasındaki toplam mesafenin minimum yapılmasıdır (Hakimi, 1964; Church ve Reville, 1976). Bu açıdan ele alınan p-medyan problemi ortalama ulaştırma maliyetini veya toplam teslim zamanını azaltmaya odaklanır.

Problemin doğası gereği yaygın olarak kullanılan maliyet unsurları para, zaman ve mesafe olabilmektedir. Talep noktalarıyla ilişkilendirilen bir ağırlık söz konusu olduğunda problem ağırlıklı p-medyan problemi olarak isimlendirilir. Bu ağırlıkların CO₂ salınımını temsil eden bir fonksiyon yardımıyla belirlenmesi neticesinde ortaya çıkan problem çevreci tesis yeri seçimi problemi olarak nitelendirilebilir.

3.1 Problemin Matematiksel İfadesi

a. İndisler:

Talep noktaları kümesi (müşteriler): $i = 1, 2, \dots, m$ adet

Aday depo yeri kümesi: $j = 1, 2, \dots, n$ adet

b. Parametreler: a_i = i noktasındaki talebin ağırlığı d_{ij} = i noktası ile j noktası arasındaki mesafe p = yerleştirilecek olan hizmet verecek tesis sayısı c_{ij} = i noktası ile j noktası arasında taşıma kaynaklı ortaya çıkan CO₂ salınımı miktarı**c. Değişkenler:** $X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{eğer i müşterisi j tesisine atanmışsa} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$ $Y_j = \begin{cases} 1 & \text{eğer j noktasında bir tesis açılmışsa} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$ **d. Amaç fonksiyonu:**

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \cdot d_{ij} \cdot x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (2)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1 \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$X_{ij} \leq Y_j \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n Y_j = p \quad (5)$$

$$X_{ij}, Y_j \in \{0,1\} \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

Çalışmada ele alınan amaç fonksiyonu (1) açılması düşünülen tesisler arasındaki taşıma mesafesini en küçüklemektedir. Diğer amaç fonksiyonu (2) ise taşıma kaynaklı meydana gelen CO₂ salınımını en küçüklemektedir. Söz konusu iki amaç fonksiyonu doğrusal ilişkili olup, Denklem (1)'de ifade edilen amaç fonksiyonu ile taşıma mesafesi en küçüklendiğinde Denklem (2)'de ifade edilen amaç fonksiyonundaki CO₂ salınım miktarı da en küçüklenmiş olmaktadır. Bu yönü ile model gerçek bir problemi her iki amaç ile de ele alarak doğru yer seçiminin hem taşıma maliyetleri hem de CO₂ salınımı üzerindeki etkisini analiz etmeyi mümkün kılmaktadır. Denklem (3) her bir talep düğümünün yalnızca bir tesise atanmasını sağlamaktadır. Denklem (4) talep düğümlerinin yalnızca açık tesislere atanmasını sağlamaktadır. Denklem (5) ise açılması planlanan tesis sayısını belirlemektedir.

4. Endüstriyel Uygulama

Çalışmanın yürütüldüğü firmanın toplam 27 adet talep noktası vardır (Şekil 1). Firma bu talep noktalarına ilişkin teslimat sürelerini azaltarak müşterilerine karşı hizmet kalitesini artırmak amacıyla depo ya da depolar açmayı düşünmektedir. Aynı zamanda taşıma kaynaklı meydana gelen CO₂ salınımını minimize edecek en iyi depo yerlerinin ve sayısının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Firma mühendisleri ve yöneticileri ile yapılan görüşmelerde firmanın talep noktalarının sayısı ve yerleri tespit edilmiştir.

**Şekil 1.** Talep Noktalarının Dağılımı

Şekil 1’de görüldüğü gibi firmanın 27 adet talep noktası Türkiye’nin çok çeşitli illerinde yer almaktadır ve bu durum yüksek taşıma maliyetlerine ve yüksek CO₂ salınımına sebep olmaktadır. Bu 27 adet talep noktasına dair geçmiş dönem satış/sevk adetleri alınarak bu veriler üzerinden firmanın her talep noktası için talep ağırlıkları belirlenmiştir. Talep noktaları arasındaki mesafeler ise Google Haritalar vasıtasıyla hesaplanmıştır.

Çalışmanın odaklandığı diğer amaç ise, her bir düğümün bir araç tarafından en az bir kez ziyaret edildiği, her bir düğümün taleplerinin karşılandığı ve her bir düğümün iadelerinin toplandığı durumda ortaya çıkacak taşıma kaynaklı CO₂ salınımını en aza indirecek bir rota seti elde etmektir. CO₂ salınımı temel olarak aracın tükettiği yakıt miktarı ile doğru orantılıdır. Yakıt tüketimi ise araç tipine, araç hızına ve ağırlığına göre değişkenlik gösterebilmektedir. CO₂ salınımını hesaplamak için literatürde birçok yöntem kullanılmakta olup, bu çalışmada Hickman vd. (1999)’nin ortaya koydukları yöntem kullanılmaktadır. Hickman vd. (1999)’a göre kat edilen mesafe (km) başına salınan toplam CO₂ miktarı (kg) (F) Denklem (7) ile hesaplanmaktadır.

$$F = K + av + bv^2 + cv^3 + \frac{d}{v} + \frac{e}{v^2} + \frac{f}{v^3} \quad (7)$$

Denklem (7)’de yer alan v aracın ortalama hızını (km/s), K önceden belirlenen bir sabiti, a,b,c,d,e ve f ise araç tipine göre değişkenlik gösteren parametreleri ifade etmektedir. Bu parametreler Hickman vd. (1999) tarafından 2 farklı sınıflandırma şekliyle ifade edilmiştir: 30-40 ton arasında ağırlığa sahip araçlar için K=1576; a=-17,6; b=0; c=0.00117; d=0; e=36067; f=0 ve 7-16 ton arasındaki araçlar için ise K=871; a=-16; b=0,143; c=0; d=0; e=32031; f=0. Çalışmanın yapıldığı şirketin araç ağırlıkları göz önüne alınarak her bir litre yakıt tüketiminin yaklaşık 2,63 kg CO₂ salınımına sebebiyet verdiği tespit edilmiştir.

Talep noktaları arasındaki taşıma kaynaklı ortaya çıkan toplam CO₂ salınımı miktarı, kat edilen mesafe başına salınan CO₂ miktarları ile talep noktaları arasındaki mesafenin çarpımı ile Denklem (8)’de hesaplanmıştır.

$$c_{ij} = F \cdot d_{ij} \quad (8)$$

Ele alınan çalışmada firmanın 27 adet talep noktasına hizmet sunmak için ortaya çıkan taşıma maliyeti ve karbon salınım miktarını minimum seviyede tutmak amacıyla açılması gereken tesis sayısının ve tesis yerlerinin belirlenmesi için IBM OPL CPLEX programı kullanılmıştır. Çalışmanın uygulandığı firma olan Aygersan A.Ş. yönetiminin açılacak bayi sayısını en fazla 5 olarak belirlemesi sebebiyle p=1-5 senaryoları incelenmiştir, her bir p sayısı için karbon salınım miktarları ve kat edilen mesafeler takip eden tablolarda sunulmuştur.

Modelde p=1 için; kat edilen mesafe 113804 km, toplam CO₂ salınımı ise 10770 kg tespit edilmiştir. Bu durumda kurulması planlanan tesisin 5 numaralı talep noktasına açılmasına karar verilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. p=1 için Talep Noktası Atamaları, Kat edilen Toplam Mesafe ve CO₂ Salınım Miktarı

Optimum tesis yeri	Hizmet Verilen Talep Noktası	Kat Edilen Toplam Mesafe (km)	Toplam CO ₂ Salınımı (kg)
Talep Noktası 5	Talep Noktası 1-27	113.804	10.770

p=2 için; kat edilen mesafe 69238 km, toplam CO₂ salınımı ise 5854 kg olarak tespit edilmiştir. Bu durumda kurulması öngörülen 1. tesisin 13 numaralı talep noktasına, 2. tesisin ise 25 numaralı talep noktasına açılmasına karar verilmiştir. Açılacak tesislerin hangi talep noktalarına hizmet vereceği Tablo 3’te ifade edilmiştir.

Tablo 3. p=2 için Talep Noktası Atamaları, Kat edilen Toplam Mesafe ve CO₂ Salınım Miktarı

Optimum tesis yeri	Hizmet Verilen Talep Noktası	Kat Edilen Toplam Mesafe (km)	Toplam CO ₂ Salınımı (kg)
Talep Noktası 13	Talep Noktası 9-22 ve 24	69.238	5.854
Talep Noktası 25	Talep Noktası 1-8, 23 ve 25-27		

p=3 için; kat edilen mesafe 42078 km, toplam CO₂ salınımı ise 3895 kg olarak tespit edilmiştir. Bu durumda kurulması öngörülen 1. tesisin 13 numaralı talep noktasına, 2. tesisin ise 25 numaralı talep noktasına, 3. tesisin ise 21 numaralı talep noktasına açılmasına karar verilmiştir. Açılacak tesislerin hangi talep noktalarına hizmet vereceği Tablo 4’te ifade edilmiştir.

Tablo 4. p=3 için Talep Noktası Atamaları, Kat edilen Toplam Mesafe ve CO₂ Salınım Miktarı

Optimum tesis yeri	Hizmet Verilen Talep Noktası	Kat Edilen Toplam Mesafe (km)	Toplam CO ₂ Salınımı (kg)
Talep Noktası 13	Talep Noktası 10-20 ve 24	42.078	3.895
Talep Noktası 25	Talep Noktası 1-6, 8, 23 ve 25-27		
Talep Noktası 21	Talep Noktası 7, 9, 21 ve 22		

p=4 için; kat edilen mesafe 25409 km, toplam CO₂ salınımı ise 2820 kg olarak tespit edilmiştir. Bu durumda kurulması öngörülen 1. tesisin 5 numaralı talep noktasına, 2. tesisin ise 14 numaralı talep noktasına, 3. tesisin 21 numaralı talep noktasına

ve 4. tesisin ise 23 numaralı talep noktasına açılmasına karar verilmiştir. Açılacak tesislerin hangi talep noktalarına hizmet vereceği Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. p=4 için Talep Noktası Atamaları, Kat edilen Toplam Mesafe ve CO₂ Salınım Miktarı

Optimum tesis yeri	Hizmet Verilen Talep Noktası	Kat Edilen Toplam Mesafe (km)	Toplam CO ₂ Salınımı (kg)
Talep Noktası 5	Talep Noktası 3-6, 9, ve 24	25.409	2.820
Talep Noktası 14	Talep Noktası 1-6, 8, 23 ve 25-27		
Talep Noktası 21	Talep Noktası 7, 9, 21 ve 22		
Talep Noktası 23	Talep Noktası 1, 2, 8, 23, 25		

p=5 için; kat edilen mesafe 17627 km, toplam CO₂ salınımı ise 2095 kg olarak bulunmuştur. Bu durumda kurulması öngörülen 1.tesisin 6 numaralı talep noktasına, 2.tesisin ise 7 numaralı talep noktasına, 3. tesisin 14 numaralı talep noktasına, 4. tesisin 21 numaralı talep noktasına ve 5. tesisin ise 23 numaralı talep noktasına açılmasına karar verilmiştir. Açılacak tesislerin hangi talep noktalarına hizmet vereceği Tablo 6'te gösterilmiştir.

Tablo 6. p=5 için Talep Noktası Atamaları, Kat edilen Toplam Mesafe ve CO₂ Salınım Miktarı

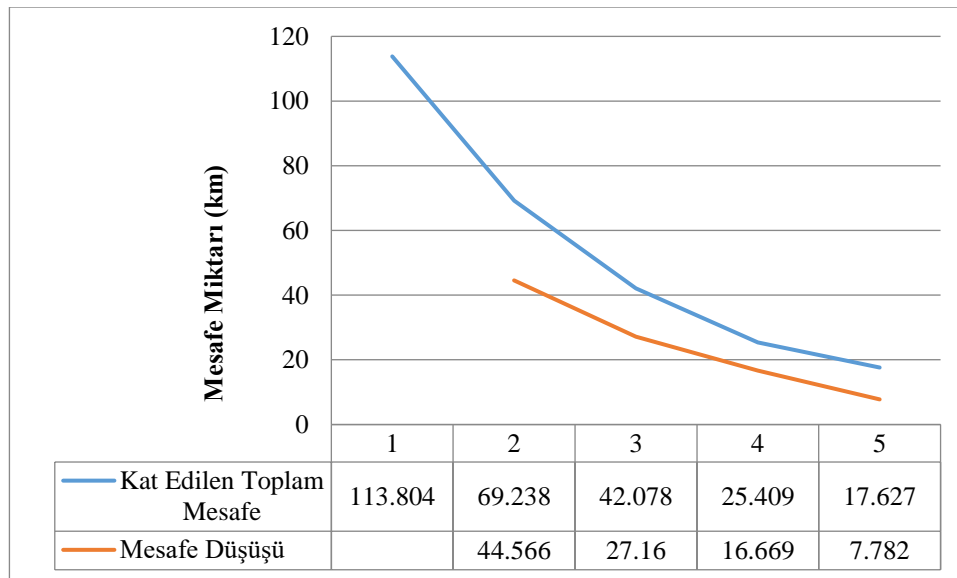
Optimum tesis yeri	Hizmet Verilen Talep Noktası	Kat Edilen Toplam Mesafe (km)	Toplam CO ₂ Salınımı (kg)
Talep Noktası 6	Talep Noktası 3-6, 9, ve 24	17.627	2.095
Talep Noktası 7	Talep Noktası 1-6, 8, 23 ve 25-27		
Talep Noktası 14	Talep Noktası 7, 9, 21 ve 22		
Talep Noktası 21	Talep Noktası 1, 2, 8, 23, 25		
Talep Noktası 23	Talep Noktası 1, 2, 8, 23, 25		

Açılması düşünülen tesisler ya da tesislerin sayısını ve yerlerini belirlemek adına geliştirilen 5 farklı senaryonun karşılaştırılması Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Tablo 8 p=1,2,3,4,5 Modellerinin Karşılaştırılması

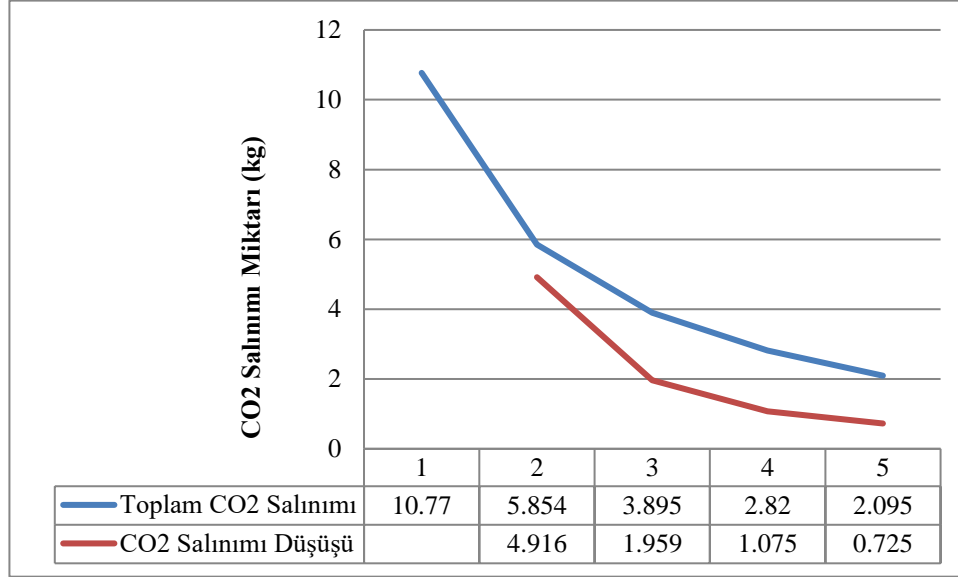
Tesis Sayısı	Kat Edilen Toplam Mesafe (km)	Toplam CO ₂ Salınımı (kg)	Tesis Yeri
1	113.804	10.770	Talep Noktası 5
2	69.238	5.804	Talep Noktası 13 ve 25
3	42.078	3.895	Talep Noktası 13, 21 ve 25
4	25.409	2.820	Talep Noktası 5, 14, 21 ve 23
5	17.627	2.095	Talep Noktası 6, 7, 14, 21 ve 23

Optimum tesis sayısının belirlenmesi amacıyla elde edilen mesafe ve CO₂ salınım miktarları doğrultusunda tesis sayısı-mesafe ve tesis sayısı-CO₂ salınımı grafikleri çizilmiştir.



Şekil 2. Tesis Sayısı - Mesafe (km) İlişkisi Grafığı

Şekil 2’de görüldüğü gibi, optimum tesis sayısını belirlemek açısından toplam mesafe ve tesis sayısı değerlerinin yanında elde edilen marjinal katkıyı ifade eden mesafe düşüşü değerlerine de yer verilmiştir. Grafiğin altında verilen mesafe değerleri, tesis sayısının değişimine bağlı olarak azalan mesafeleri ifade etmektedir. Grafiğin altında yer alan mesafe düşüşü değerleri ise açılacak tesis sayısı arttıkça mesafede meydana gelen azalmayı ifade etmektedir. Mesafe eğrisi ve mesafe düşüş eğrisi birlikte incelendiğinde en çok mesafe düşüşünün birinci tesisten ikinci tesise geçiş aşamasında olduğu görülmektedir. Meydana gelen sonraki tesis sayısı artışlarında görülen mesafe düşüşünün daha az ve birbirine yakın değerler olduğu saptanmıştır. Bu nedenle elde edilen marjinal katkı elde edildiğinde firma için optimum tesis sayısı 2 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Tesis Sayısı - CO₂ Salınımı (kg) İlişkisi Grafiği

Şekil 3’te ise tesis sayısı ile CO₂ salınımı miktarları kıyaslanmış olup tesis sayısı arttıkça salınım miktarının doğrusal olarak azaldığı saptanmıştır. Tesis sayısı- Mesafe kıyaslamasında olduğu gibi Tesis sayısı- CO₂ salınımı kıyaslamasında da en çok düşüşün birinci tesisten ikinci tesise geçiş aşamasında olduğu görülmektedir. Bu durumda firma için açılması düşünülen en uygun tesis sayısının 2 olduğu belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda bulunan bu değerlere göre de tesislerin talep noktası 13’de ve talep noktası 25’de açılmasına karar verilmiştir.

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, p-medyan tesis yeri seçimi probleminin bir türevi olan yeşil tesis yeri seçimi problemine odaklanılmıştır. Yapılan çalışma ile otomotiv sektöründeki üreticilere aydınlatma ürünleri üreten (far, stop lambası, iç aydınlatma vb.) Aygersan A.Ş.’nin piyasa üretimleri için oluşan talep noktaları doğrultusunda açılması planlanan depo yerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Toplam 27 adet talep noktası bulunan firmanın üst yönetimi tarafından bu talep noktalarına gerekli hizmetin sağlanması amacı ile en fazla 5 adet deponun açılmasına karar verilmiştir. Firmanın talep noktaları ve aralarındaki mesafeler ile taşıma kaynaklı karbon salınım miktarları göz önüne alınarak, açılması öngörülen tesis sayısının doğrusal olarak artırıldığı 5 farklı model sunulmuştur.

Ortaya koyulan senaryolar bir doğrusal programlama modeli vasıtasıyla sırası ile çözülmüştür. Çözümler neticesinde her bir model için ortaya çıkan mesafe ve karbon salınım verileri tablolar ve grafikler yardımıyla belirtilmiştir. Yapılan grafik analizi ile tesis sayısı artışlarında meydana gelen mesafe ve CO₂ azalış oranları 2. tesisten sonra düşmüş ve birbirlerine yakın değerlerde seyretmiştir. Bundan dolayı hem mesafe hem de CO₂ salınım miktarları göz önüne alındığında firma için 13 ve 25 numaralı talep noktalarında iki tesisin (deponun) açılmasına karar verilmiştir.

Bu çalışmada tesis açma kararlarını etkileyebilen yatırım maliyetleri (arsa maliyeti, kuruluş giderleri vb.) ve işletme maliyetleri (açılacak bölgedeki ortalama işçilik giderleri, yakıt giderleri, elektrik, su ödemeleri, kira giderleri vb.) göz önüne alınmamıştır. İlerde yapılacak çalışmalarda, bu çalışmada göz ardı edilen maliyetler ile üzerinde durulan mesafe ve karbon salınım oranlarını da gözeten bütünlük bir modelin ortaya konulması ve çözülmesi, açılması düşünülen tesislerin yer seçimi kararını kuvvetlendirecektir.

Referanslar

Ar, İ. M., Birdoğan, B., & Özdemir, F. (2014). Kuruluş Yeri Seçiminde Bulanık AHS-VIKOR Yaklaşımının Kullanımı: Otel Sektöründe Bir Uygulama. Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi, (13), 93-114.

- Aytekin, A., & Kaygın, B. (2005). Bilgisayar destekli işletme kuruluş yeri seçimi. Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 5(2).
- Caccetta, L., ve Dzator, M. (2005). Heuristic methods for locating emergency facilities. In Proceeding of 16th International congress on modelling and simulation, 1744-1750.
- Cömert, S. E., & Yener, F. (2017). Bir gıda firması için bulanık analitik hiyerarşi prosesi ile depo yeri seçimi. Uluslararası İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 2(2), 161-177.
- Fo, A. R. A. V., & da Silva Mota, I. (2012). Optimization models in the location of healthcare facilities: a real case in Brazil. Journal of Applied Operational Research, 4(1), 37-50.
- Goetzinger, M., Brandt, T., & Neumann, D. (2012). Green Facility Location—A Case Study.
- Hickman, J., Hassel, D., Joumard, R., Samaras, Z., & Sorenson, S. (1999). Methodology for calculating transport emissions and energy consumption.
- İlhan, R., & Burdurlu, E. (1993). Ağaç İşleri Endüstrisinde Fabrika Planlaması. HÜ, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Yayını, Ankara, 75-337.
- Karabay, S., Köse, E., & Kabak, M. (2014). Stokastik Çok Kriterli Kabul Edilebilirlik Analizi ile Bir Kamu Kurumu için Tesis Yeri Seçimi. Ege Academic Review, 14(3).
- Kim, J. H., & Soh, S. (2012). Designing hub-and-spoke school bus transportation network: a case study of wonkwang university. Promet-Traffic & Transportation, 24(5), 389-394.
- Ndiaye, F., Ndiaye, B. M., & Ly, I. (2012). Application of the P-Median problem in school allocation. American Journal of Operations Research, 2(02), 253.
- Özçakar, N., & Bastı, M. (2012). P-Medyan kuruluş yeri seçim probleminin çözümünde parçacık sürü optimizasyonu algoritması yaklaşımı. İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 41(2), 241-257.
- Özdağoğlu, A. (2010). Tesis yeri seçiminde farklı bir yaklaşım: bulanık analitik seçim süreci. Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 22(1), 421-453.
- Rawls, C. G., & Turnquist, M. A. (2010). Pre-positioning of emergency supplies for disaster response. Transportation research part B: Methodological, 44(4), 521-534.
- Rolland, E., Schilling, D. A., & Current, J. R. (1997). An efficient tabu search procedure for the p-median problem. European Journal of Operational Research, 96(2), 329-342.
- Ruslim, N. M., & Ghani, N. A. (2006). An application of the p-median problem with uncertainty in demand in emergency medical services. In Proceedings of the 2nd IMT-GT regional conference on mathematics, statistics and applications.
- Selçuk, A. L. P., & Gündoğdu, C. E. (2012). Kuruluş yeri seçiminde analitik hiyerarşi prosesi ve bulanık analitik hiyerarşi prosesi uygulaması. Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 14(1), 7-25.
- Uslu, Ç. A. (2012). Maksimum Kapsama Modeliyle Tesis Yeri Seçimi: Perakende Sektöründe Bir Uygulama. Sakarya University Journal of Science, 16(1), 24-30
- Yalçın, U. (2007). Bulanık analitik hiyerarşi prosesi kullanarak rüzgar enerjisi santral yeri seçimi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi.
- Yılmaz, B., Dağdeviren, M., & Akçayol, M. A. (2011). Hızlı Tüketim Malları Depo Yeri Seçimi Problemi İçin Genetik Algoritma İle Bir Çözüm, İTÜY, Sempozyum, Kongre ve Konferans Bildiri Koleksiyonu.



Nitratlı Bileşikler ile Hazırlanan YBCO Seramik Süperiletken Malzemelerde Li Katkısının Elektriksel ve Yapısal Etkilerinin İncelenmesi

Investigation of the Electrical and Structural Effects of Li Dopping on YBCO Ceramic Superconducting Materials Prepared with Nitrate Compounds

Mustafa Burak Türköz¹, Ümit Erdem²

¹ Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 78050, Karabük, TÜRKİYE

² Kırıkkale Üniversitesi, Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezi, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 24/05/2019

Kabul / Accepted: 01/11/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Bu çalışmada yüksek sıcaklık seramik süperiletkenlerden olan Yttriyum Baryum Bakır Oksit (YBCO) bulk malzemede, Baryum (Ba) yerine % 0,005 ve 0,1 Lityum (Li) katkısı yapılmıştır. Üretilen katkılı malzemelerde değişimin gözlenebilmesi için, katkısız YBCO örneğiyle karşılaştırılmış ve meydana gelen elektriksel ve yapısal değişiklikler tartışılmıştır. Üretim için kullanılan malzemelerin tamamı nitratlı olarak temin edilmiştir. Elde edilen malzemelerin sıcaklığa karşı öz direnç (ρ -T), akım yoğunluğuna karşı gerilim (J-V), X-ışını kırınım desenleri (XRD) ölçümleri yapılarak grafikleri elde edilmiş ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır. Bu sonuçlara göre Li katkısının artırılması ile kritik geçiş sıcaklığının düştüğü gözlenmiştir. Aynı şekilde katkı miktarının artması ile kritik akım yoğunluğunun da düştüğü gözlenmiştir. XRD sonuçlarında karakteristik pikler (013) ve (103) pikleri sola doğru kaymış ve SEM görüntülerinde taneçikler küçülmüş ve aralarındaki boşluklar artmıştır. Sonuç olarak Li katkısının süperiletkenlik özelliklerini bozduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Süperiletkenlik, YBCO, J_c , T_c , XRD, SEM, Li katkısı”

Abstract

In this study, at the Yttrium Barium Copper Oxide (YBCO) bulk material, which is one of the high temperature ceramic superconductors 0.005 and 0.1 Lithium (Li) was added to instead of Barium (Ba). In order to observe the change in the doped materials produced, it is compared with the pure YBCO sample and the resulting electrical and structural changes are discussed. All materials used for production were supplied as nitrate. Obtained materials, electrical resistivity - temperature (ρ -T), current density versus voltage (J-V), X-ray diffraction patterns (XRD) measurements were obtained and their graphs were obtained and scanning electron microscopy (SEM) images were taken. According to these results, it was observed that the critical transition temperature decreased with the increase of Li contribution. In the same way, It was observed that the critical current density decreased with the increase in the amount of additives. In the XRD results, the characteristic peaks (013) and (103) were shifted to the left and particles size are decrease and also the intergranular spaces were increased in the SEM images. As a result, it is understood that Li contribution disrupts the superconductivity properties.

Key Words

“Superconductivity, YBCO, J_c , T_c , XRD, SEM, Li doped”

1. Giriş

Kamerlingh Onnes'in 1908 yılında süperiletkenlik olayını keşfinin ardından, süperiletkenlik birçok bilim adamının ilgisini çekmiştir (Onnes, 1911). Süperiletkenler genel olarak I. Tip ve II. Tip olarak ikiye ayrılmaktadır. Niobiyum (Nb) ve Vanadyum (V) gibi süperiletkenlik özelliği gösteren elementler dışındaki tüm metalik elementler I. tip süperiletkenlerdir. Nb ve V elementleri ile süperiletkenlik özelliği gösteren tüm alaşım ve bileşikler, II. tip süperiletkenler sınıfını oluştururlar (Rose-Innes ve Rhoderick, 1978). Bununla birlikte bütün yüksek sıcaklık süperiletkenleri II. tip süperiletken sınıfına girerler. İyi bir I. tip süperiletken, H_c (kritik manyetik alan) değerine kadar tümüyle diamanyetik özellikte olup, manyetik alan çizgilerini dışarlayacaktır. H_c 'den büyük bir manyetik alan değeri uygulandığında ise, süperiletkenlik durumu birdenbire ve tamamıyla ortadan kalkacaktır (Rose-Innes ve Rhoderick, 1978). İyi bir II. tip süperiletken de ise gözlenen süperiletkenlik durumunda ise iki adet kritik manyetik alan durumu vardır. H_{c1} (birinci kritik manyetik alan) değerine kadar I. tip süperiletkenlerdeki duruma benzer bir davranış sergilerler. Buna karşılık uygulanan manyetik alan H_{c1} 'den daha büyük bir değere sahipse I. tip süperiletkenlerin tersine olarak süperiletkenlik özellikleri ortadan kalkmaz. Fakat uygulanan manyetik alan H_{c2} ile ifade edilen ikinci bir manyetik alan değerini aştığında süperiletken özellik tamamen ortadan kalkacaktır (Rose-Innes ve Rhoderick, 1978). Bu çalışmada II. Tip Süperiletkenlerden olan $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO (Y123)) üzerinde inceleme yapılmıştır (Meissner, ve Ochsenfeld, 1933; Bardeen ve Cooper, 1957; Josephson, 1962; Yvon ve Francois, 1989; Alecu, 2004; Turkoz, Nezir ve Ozturk, 2013; Turkoz, Nezir ve Varilci, 2013; Turkoz, Nezir ve Terzioglu, 2012; Raymond, 2007).

Literatürde YBCO süperiletken malzemelere Li katkısıyla ilgili kısıtlı veriye ulaşılabilmektedir. Antal ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada Cu bölgesine Li katkısı üst üste eritme büyütme metodu ile yapılmıştır. Bu katkıyla ile numunelerin pimleme özelliklerini geliştiren ve kritik akım yoğunluğunu arttıran etkili pimleme merkezleri oluştuğu gözlenmiştir (Antal ve Volochová, 2017). Horvath ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, üst üste eritme büyütme metodu ile Cu bölgesine Li ve Ce katkılanması yapılmış ve Tc ve J_c 'nin, SQUID manyetometresi kullanılarak ölçülen referans örnekleme kısıyası değişimi incelenmiştir (Horvath ve Harnois, 2008). S.J. Manton ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Y123 tozunun içerisinde %10 Y211 ve %1 LiHO katkısı eritme büyütme yöntemi ile süperiletken örnekler üretilmiş ve katkıyla ile akı çivilemesi incelenmiştir (Manton ve Beduz, 1998).

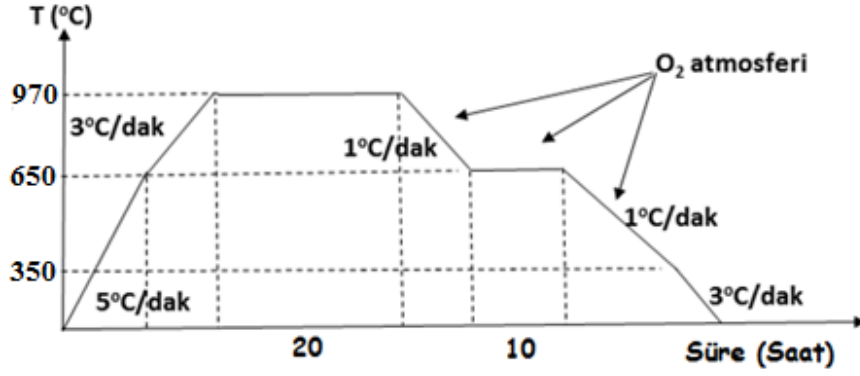
Bu çalışmada ise diğer çalışmalardan farklı olarak, Ba bölgesine Li katkısı yapılmıştır. Üretilen örneklerin, kritik geçiş sıcaklığını, parçacık boyutları ile parçacıklar arasındaki boşlukların değişimi ve XRD grafiklerinden yararlanarak, Ba bölgesine yapılan Li katkısının üretilen YBCO seramiklerinin, süperiletkenlik özelliklerini nasıl değiştirdiği incelenmiştir. Bununla birlikte bu çalışmada nitrattlı bileşikler kullanılarak malzemelerin üretiminin gerçekleştirilmiş olması ve Li katkısının Ba bölgesine yapılmış olması bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran en önemli özelliktir. Nitrattlı bileşikler kullanılması kimyasalların birbirine tam olarak karışmasını sağlayarak, sonuç malzemenin daha kaliteli üretilmesine olanak sağladığı düşünülmektedir.

2. Materyal ve Metot

Üretilen süperiletken örneklerde kullanılan kimyasallar; %99,9 saflıkta Yitriyum Nitrat; $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, %99,5 saflıkta Bakır Nitrat; $Cu(NO_3)_2 \cdot 3(H_2O)$, %99 saflıkta Baryum Nitrat; $Ba(NO_3)_2$ ve %99,9 saflıkta Lityum Nitrat; $LiNO_3$ olmak üzere, süperiletken örnekler,



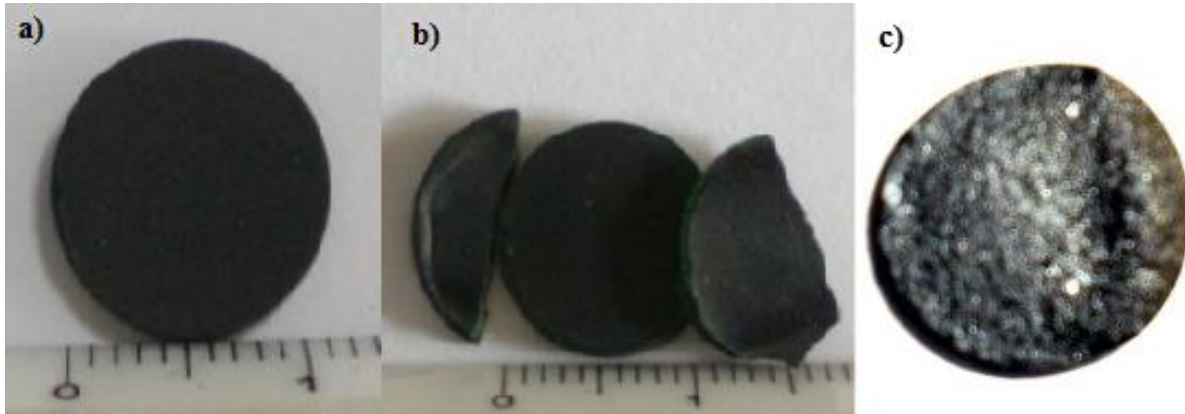
reaksiyon denkleminde uygun olarak üretilmiştir (Turkoz, Nezir ve Ozturk, 2013; Turkoz, Nezir ve Varilci, 2013; Turkoz, Nezir ve Terzioglu, 2012; Vardar ve Bowman, 2019). Hedeflenen seramik Y123 süperiletken malzemelerin üretiminde kullanılan kimyasalların birbirine tam olarak karışmasını sağlamak amacıyla nitrat içeren bileşikler kullanılmış ve $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ seramik süperiletkenler elde edilmiştir (Rose-Innes ve Rhoderick, 1978; Vardar ve Bowman, 2019; Kikuchi ve Syono, 1987). Üretim aşamasında nitrattlı Li, Y, Cu ve Ba bileşiklerinin çekmiş olabilecekleri muhtemel nemden kurtarılması amacıyla 10 saat 40 °C sıcaklıkta etüvde bekletilmiştir. Bu işlemin ardından hesaplanan uygun miktarlarda tartılmış ve cam beherlere konularak iyice karıştırılmıştır. Kullanılan kimyasalların nitrattlı olmasından dolayı ısı işlem sırasında zehirli gaz çıkışı olacağı için çeker ocak içerisinde 200 °C'lik ısı işlemi tabi tutulmuştur. Bu sıcaklık değerinde nitrat içeren kimyasallardan oluşan karışım, içeriğindeki nitrattan dolayı erimeye başlamıştır. Bir süre bu sıcaklıkta beklenince karışım tamamen erimiştir. Daha sonra sıcaklık kademeli olarak 350 °C kadar çıkarılmıştır. Tamamen eriyen karışımdan siyah gaz çıkmaya başlamıştır. Bu gazın solunmaması için çeker ocak çalıştırılmış ve oluşan bu gaz ortamdan tahliye edilmiştir. Bu aşamada malzeme içerisinde hiç gaz kalmaması için sıvı cam bağıt ile sürekli karıştırılmıştır. Bu şekilde sıcaklığın sıvının her tarafına eşit olarak ulaşması ve kimyasalların tamamen karışması da sağlanmış olmaktadır. Bu aşamadan sonra sıcaklık yine kademeli olarak artırılmış ve yaklaşık 500–550 °C kimyasallar tamamen siyah bir renge alana kadar iki saat kadar bekletilmiştir. Elde edilen ürün 10 saat 800°C'de kalsinasyon işlemine tabi tutulmuştur. Kalsinasyon işlemi, bir sonraki basamakta üretilen tabletlerde, toz içerisinde kalan muhtemel gazların tabletlerde çökme oluşturmaması için oldukça önemlidir. Kalsinasyon aşamasından sonra elde edilen siyah toz ağıt havan yardımıyla tamamen öğütülmüş ve hidrolik pres yardımıyla 5 bar basınç altında 13 mm'lik tabletler üretilmiştir. Bu tabletler 970°C sıcaklıkta Şekil.1'de görülen sürece uygun olarak sinterlenmiştir. Üretilen katkısız ve Li katkılı süperiletken tabletler dikdörtgen şeklinde kesilerek dört noktadan kontak yapılmıştır. Bu aşamada gümüş teller kullanılmıştır. Daha sonra üretilen Y123 seramik süperiletken malzemelerin karakterizasyon aşamasına geçilmiştir.



Şekil 1. Hazırlanan Y123 Örneklerin Sinterleme Süreci.

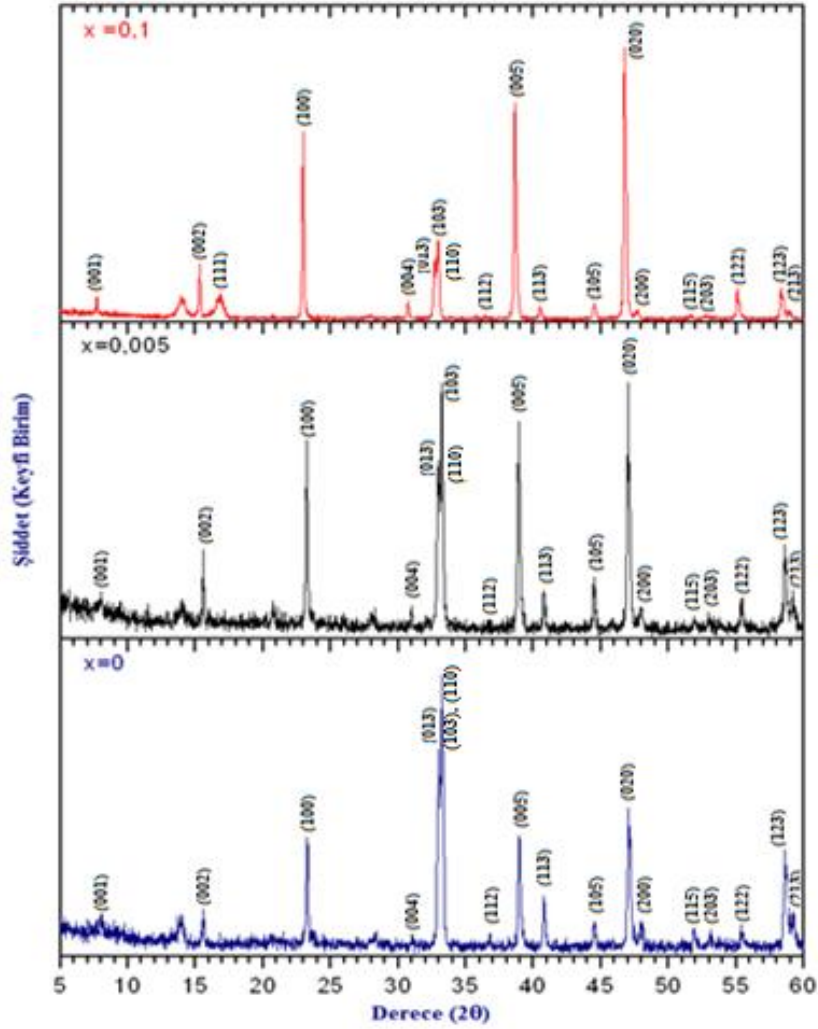
3. Bulgular ve Tartışma

970 °C’de sinterlenerek üretilen örnekler Şekil 2. a)’da görülmektedir. Şekil 2. b)’de 960°C’de sinterlenen örnekte oluşan yeşil faz açıkça görülmektedir, buradan süperiletkenliğin tam olarak meydana gelmediği anlaşılmaktadır. Şekil 2. c)’de ise 980 °C’de sinterlenen örnekte meydana gelen erime görülmektedir. Bu resimlerden de anlaşılacağı gibi en uygun sinterleme sıcaklığı 970 °C olarak kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada üretilen katkısız ve Li katkılı örnekler 970 °C’de 10 saat sinterlenmiştir. Elde edilen katkısız $x=0,005$ ve $x=0,01$ Li katkılı örneklerin karakterizasyonlarından elde edilen sonuçlar ise şu şekildedir;



Şekil 2. a) 970° C’de üretilen YBCO örneği b) 960° C’de örnekte meydana gelen yeşil faz c) 980° C’de örnekte meydana gelen erime

Şekil 3’de katkısız ve Li katkısı yapılmış seramik süperiletken malzemelerin XRD desenleri verilmiştir. M. Kikuchi, ve arkadaşlarına göre YBCO için belirleyici piklerden olan (110) pikinin şiddetinin (013) pikinin şiddetinden daha fazla olması durumunda yapı oksijen eksikliği olmayan ortorombik yapıya sahip iyi bir süperiletken olarak ifade edilmektedir, bunun zıddına (013) pikinin şiddetinin (110) pikinin şiddetinden daha fazla olması durumunda yapı tetragonal olup, süperiletkenliği bozan oksijen eksikliğinden ortaya çıkmaktadır (Kikuchi ve Syono, 1987). Şekil 3.’de gösterilen XRD grafiğindeki örneklerin hepsinde (110) pikinin şiddetinin (013) pikinin şiddetinden daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durumda süperiletkenlerin kristal yapılarının ortorombik olduğu söylenebilir, yani malzemelerin hepsi süperiletken özelliindedir. Ayrıca malzemelerde oksijen eksikliği bulunmadığı da söylenebilir. Buradan da seramik Y123 süperiletkenlerinin başarılı bir şekilde elde edildiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3. Katkısız, $x=0,1$ ve $0,005$ Li katkılı örneklerin XRD sonuçları

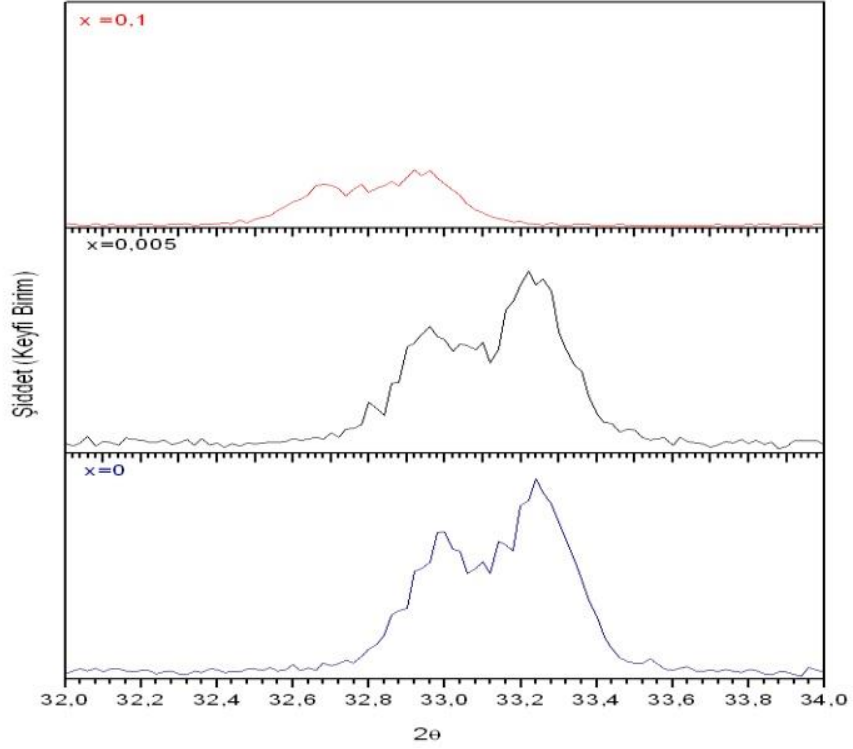
(110) ve (013) piklerinin katkı oranındaki değişime göre durumları Şekil 4’de daha açık bir şekilde görülmektedir. Buradan Li katkısının artmasıyla (110) ve (013) piklerinin sola doğru kaymaya başladığı anlaşılmaktadır. Bu kaymanın sebebinin, Li miktarının artmasıyla kübik yapının hacminde meydana gelen küçülme ve Şekil 3.6’da görülen SEM görüntülerindeki parçacık boyutlarının azalması ve buna bağlı olarak da süperiletkenlikteki mükemmel iletimden sorumlu olan parçacıklar arasındaki temasın azalması olarak yorumlanmıştır. $x=0,1$ Li katkılı XRD grafiğinde görülen (111) piki diğer piklerden farklı olarak YBCO’nun karakteristik piklerinden olmayıp, safsızlıklarında etkisi ile Li katkısından kaynaklanan LLZO ($\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$) piki olduğu düşünülmektedir (Vardar ve Bowman, 2019). Katkısız YBCO örneğinde Li’ye ait pikin olmaması fakat bununla birlikte Li katkısının artmasıyla, Li’ye ait pikin ortaya çıkmaya başlaması Li katkısının başarılı bir şekilde yapıldığının göstergesi olarak kabul edilebilir.

Tablo 3. Örgü parametreleri

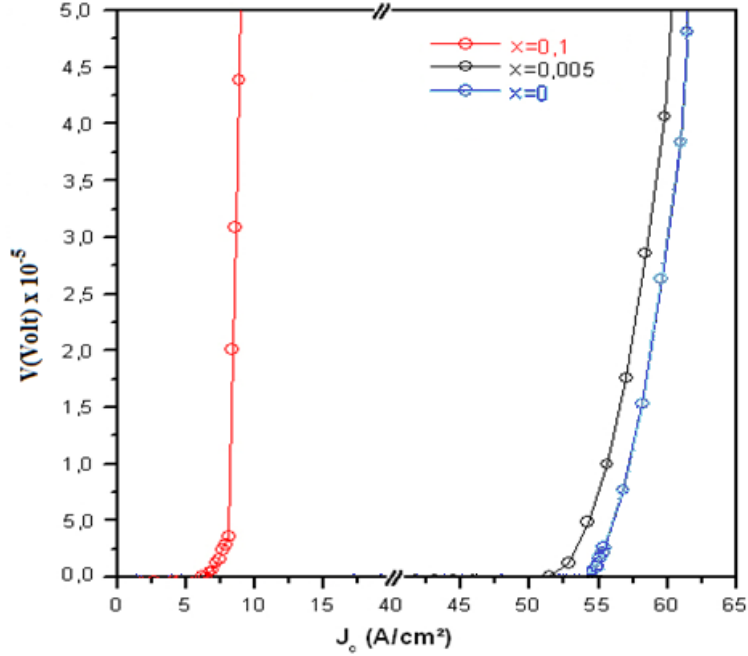
Örgü Parametreleri					
Li Katkı Miktarı (%)	a (Å)	b (Å)	c (Å)	V (Å ³)	$V_x - V_0$ (Å ³)
0	3,81	3,88	11,65	172,40	-
0,005	3,81	3,86	11,34	166,77	5,63
0,1	3,80	3,84	11,27	164,45	7,95

Eğer iyonik yarıçapı küçük olan bir elementle iyonik yarıçapı büyük olan bir element birim hücrede yer değiştirirse ve bu element birim hücrenin uzay boşluğunda yer alıyorsa; c örgü parametresinin küçüleceği söylenebilir. Buna göre Ba elementinin iyonik yarıçapının $1,35$ Å ve Li elementinin iyonik yarıçapının ise $0,76$ Å olmasından dolayı c örgü parametresinin azalacağı

rahatlıkla söylenebilir (Kikuchi ve Syono, 1987). Tablo 3’de bu durum açıkça görülmektedir. Li atomunun iyonik yarıçapı, Ba atomunun iyonik yarıçapından daha az olmasından dolayı özellikle c örgü parametresinde azalma olmuş ve buna bağlı olarak da kristal yapı hacminde Tablo 3’de belirtilen azalmalar meydana gelmiştir.

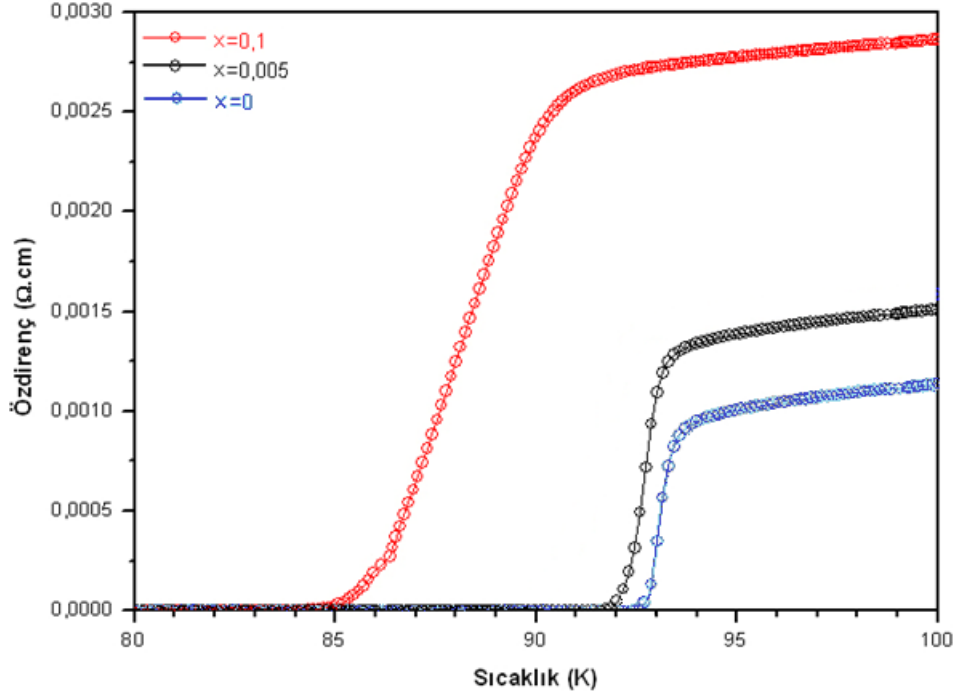


Şekil 4. $x=0,1$ ve $0,005$ Li katkı ve katkısız örneklerin $32-34^\circ$ aralığındaki XRD grafikleri



Şekil 5. $x=0,1$ ve $0,005$ Li katkı ve katkısız örneklerin kritik akım yoğunluğu grafikleri

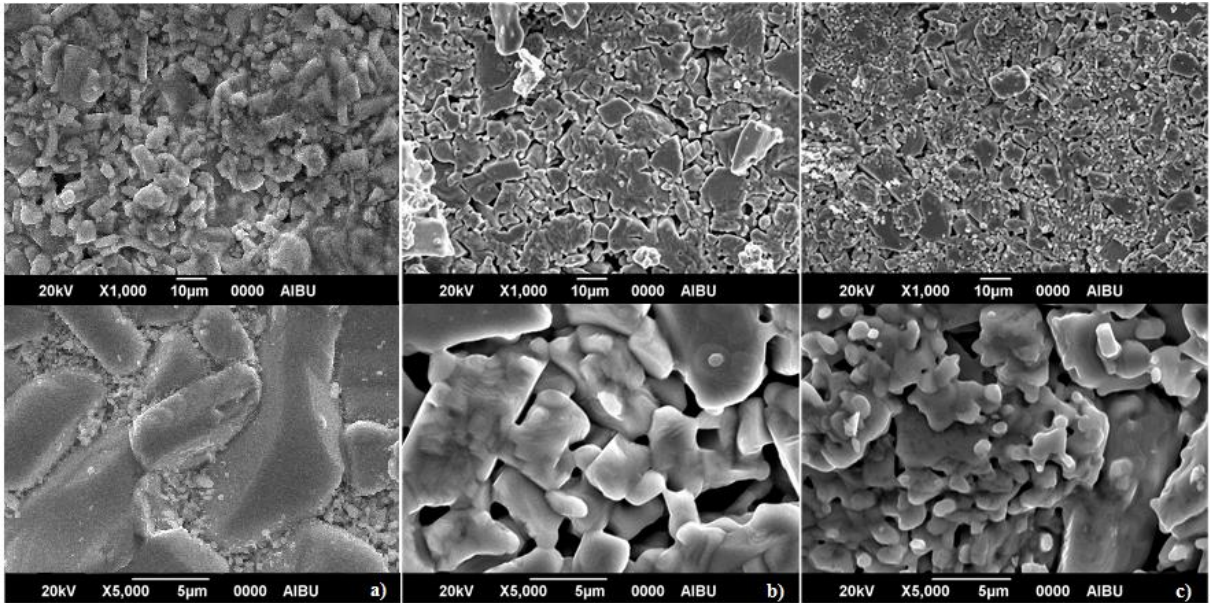
Örneklerin Şekil 5’de verilen $V-J_c$ grafiklerine bakıldığında, katkısız örneğin yaklaşık 55 A/cm^2 kritik akım yoğunluğuna sahip olduğu, $0,005$ Li katkısı ile J_c ’nin biraz düşerek yaklaşık 53 A/cm^2 değeri aldığı ve $0,1$ Li katkısıyla birlikte kritik akım yoğunluğunun biraz bir düşme ile 7 A/cm^2 değerini aldığı görülmektedir. Bu düşmenin Şekil 3.6’da görülen ve Li katkısının artması ile küçülen parçacık boyutları ve artan parçacıklar arasındaki boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir (Kikuchi ve Syono, 1987).



Şekil 6. $x=0,1$ ve $0,005$ Li katkılı ve katkısız örneklerin ρ -T grafikleri

Örneklerin Şekil 6'da verilen Özdirenç - Sıcaklık grafiklerinden, katkısız örneğin kritik geçiş sıcaklığının yaklaşık $T_c=93$ K olduğu ve $0,005$ Li katkısıyla diğer ölçümlerdeki sonuçları destekler nitelikte T_c 'nin bir miktar düşerek 92 K'in hemen altına azaldığı ve 0.1 Li katkısı ile T_c 'nin 85 K kadar düştüğü görülmektedir. Kritik sıcaklığın, örgüdeki oksijen miktarıyla oldukça ilişkili olduğu ve nötron kırınımı çalışmalarından, oksijen boşluklarının düzenlenmesi ile $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ süperiletken malzemenin maksimum kritik sıcaklığa ulaşabileceği anlaşıldı (Hughes, 1988). Buradaki düşüşün ise Li katkısının artması ile Şekil 7'deki SEM görüntülerindeki parçacık boyutlarındaki azalma ve parçacıklar arasındaki boşlukların artmasına bağlı olarak iletimin azalması yani kritik geçiş sıcaklığının gitgide azalması olarak yorumlanabilir.

Sonuçta tüm grafikler de Li katkısı artışı ile gözlenen iletkenlik özelliklerinin düşüşünün yegâne sebebinin parçacıklar arasındaki iletimin azalmasına sebep olan, parçacık boyutlarının azalması ve parçacıklar arasındaki boşlukların artması olarak yorumlamak yerinde olacaktır.



Şekil 7. a) Katkısız YBCO örneğinin SEM görüntüsü, b) $0,005$ Li Katkılı Örneğin SEM Görüntüsü, c) $x=0,1$ Li katkılı Örneğinin SEM Görüntüsü.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 970 °C'de 10 saat süreyle sinterlenen katkısız, $x=0,005$ ve $x=0,1$ Li katkılı Y123 süperiletken örneklerinin XRD, E-Jc, ρ -T ve SEM sonuçları incelenmiştir. Bu sonuçlara göre katkı oranının artması ile (110) ve (013) piklerinin sola doğru kaydığı görülmektedir. Yine, Li katkısındaki artış ile kritik akım yoğunluğunun bariz bir şekilde düştüğü, bunun da süperiletkenliğin bozulduğu anlamına geldiği söylenebilir. Aynı şekilde, Li katkısının artırılması kritik geçiş sıcaklığını da düşürmüştür. Tüm bu sonuçlar süperiletkenlik özelliğinin bozulduğunu doğrular niteliktedir. SEM görüntülerine bakıldığında ise Li katkısının artması ile parçacıkların küçülüp, parçacıklar aralarındaki boşlukların ise arttığı görülmektedir. Bu durum iletimde rol oynayan parçacıklar arasındaki temasın mekaniksel olarak azalması şeklinde de değerlendirilebilir. Tüm bu sonuçların ışığında Y123 süperiletkeninde Ba yerine Li katkısı yapıldığında süperiletkenlik özelliklerinin belirgin bir şekilde azaldığı söylenebilir.

Referanslar

- Alecu G. (2004). Romanian Reports of Physics, 56, 404-12.
- Antal, V., Volochová, D., Kavecanský, V., Kovác, J., Diko, P. (2017). Influence of annealing in oxygen and argon on the superconducting properties of Li-doped YBCO single-grain bulks, Physica C: Superconductivity and its Applications, 541, 22–29
- Bardeen, J., Cooper, L.N. and Schrieffer (1957). J. R., Phys. Rev. Lett. 108, 1175-204.
- Horvath, D., Harnois, C., Noudem, J.G. (2008). Li and Ce doping of melt-textured YBCO: Improved j_c at medium fields, Materials Science and Engineering B, 151, 36–39.
- Hughes, D.D. (1988). Materials Matter 4, 741–45.
- Josephson, B.D. (1962). Phys. Letters 1, 251-53.
- Kikuchi, M., Syono, Y., Tokiwa, A., Oh-ishi, K., Arai, H., Hiraga, K., Kobayashi, N., Sasaoka, T., Muto, Y. (1987). Thermal and X-ray analyses of high temperature superconductor $YBa_2Cu_3O_{6.74}$, Japanese Journal of Applied Physics 26, 1066–69,
- Manton, S.J., Beduz, C., Yang, Y., Deligiannis, K., deGroot, P.A.J. (1998). Enhanced flux pinning in lithium doped melt grown YBCO by low fluency neutron irradiation, Materials Science and Engineering 853, 152- 84.
- Meissner, W. and Ochsenfeld, R. (1933). Naturwissenschaften, 21, 787-88.
- Onnes, H.K. (1911). The resistance of pure mercury at helium temperature, Leiden Community No. 120b, 122b, 124c.,
- Raymond A., Serway, (2007). John W. Jewett, Serway Physics, Third Edition USA Chicago 1305.
- Rose-Innes, A.C., Rhoderick, E.H. (1978). Introduction to Superconductivity Second Edition, Oxford Pergamon Press, Chapter: 21 (2), 19.
- Turkoz, M. B., Nezir, S., Ozturk, O., Asikuzun, E., Yildirim, G., Terzioglu, C. and Varilci, A. (2013). Experimental and Theoretical Approaches on Mechanical Evaluation of Y123 system by Lu addition, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 24 (7), 2414-21.
- Turkoz, M. B., Nezir, S., Varilci, A., Yildirim, G., Akdogan, M., Terzioglu, C. (2013). Experimental and Theoretical Approaches on Magnetoresistivity of Lu-Doped Y-123 Superconducting Ceramics, Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 24 (3), 1536–45.
- Turkoz, M. B., Nezir, S., Terzioglu, C., Varilci, A., Yildirim, G., (2012). Investigation of Lu Effect on $YBa_2Cu_3O_{7.6}$ Superconducting Compounds, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 23 (11), 1965-70.
- Vardar, G., Bowman, W. J., Lu, Q., Wang, J., Chater, R. J., Aguadero, A., Seibert, R., Terry, J., Hunt, A., Waluyo, I., Fong, D.D., Jarry, Angelique., Crumlin, E. J., Hellstrom, S.L., Chiang Y.M., and Yildiz, B. (2019). Structure, Chemistry, and Charge Transfer Resistance of the Interface between $Li_7La_3Zr_2O_{12}$ Electrolyte and $LiCoO_2$ Cathode, Chemistry of materials, DOI: 10.1021/acs.chemmater.8b01713.
- Yvon K., Francois M. (1989). Crystal Structures Of High-Tc Oxides, Z.Phys. B-Condensed Matter, 76, 413–44.



H₂SO₄ İle Aktive Edilen Keşan Yöresi Bentonitinin Di Azo Boyar Madde Bazık Sarı 28 Denge Adsorpsiyonu Karakteristiklerinin İncelenmesi

Investigation of Equilibrium Adsorption Characteristics of Di Azo Dyes Basic Yellow 28 of H₂SO₄ Activated Kesan Region Bentonite

Yasemen Kalpaklı¹ , Şilan Ekinci¹ , Dilan Ertaş¹ 

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 34220 İstanbul, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 12/07/2019

Kabul / Accepted: 13/11/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Bu çalışmada Keşan yöresi asit aktive Ca-Bentoniti adsorbant olarak kullanılmıştır. Tekstil, kozmetik, gıda, kâğıt, halı ve plastik gibi endüstri alanlarında geniş çapta kullanımı olan boyar maddelerden di azo kromorf yapısına sahip Bazık Sarı 28'in (BY28) adsorpsiyon karakteristiği incelenmiştir. Adsorpsiyon üzerinde doğrudan etkili pH, adsorbant miktarı, denge zamanı ve başlangıç konsantrasyonu gibi koşullar BY28 adsorpsiyonu için optimize edilmiştir. Denge adsorpsiyon koşulları olarak pH= 6, 0,05 g adsorbant miktarı ve denge zamanı olarak 40 dakika elde edilmiştir. Denge adsorpsiyon koşullarında elde edilen deneysel sonuçlar lineerleştirilmiş Langmuir modeli ($R^2=0,9987$), Freundlich modeli ($R^2=0,8887$) ve Dubinin-Radushkevich (D-R) ($R^2=0,5594$) karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Keşan yöresine ait asit aktive Ca-bentonitin tek tabaka adsorpsiyon kapasitesi 116,3 mg/g olarak elde edilmiştir. 25 °C denemeler için Gibbs serbest enerjisi (ΔG°) hesaplanmış ve BY28'in asit aktive bentonit üzerine adsorpsiyon mekanizmasının istemli bir reaksiyon olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“BY 28, asit aktive bentonit, adsorpsiyon”

Abstract

In this study, acid activated Ca-Bentonite of Keşan region was used as adsorbent. Adsorption characteristics of Basic Yellow 28 (BY28) which has di azo chromorph structure, which is widely used in industry such as textile, cosmetics, food, paper, carpet, and plastic were investigated in batch system. Conditions such as pH, adsorbent amount, equilibrium time, and initial concentration which are directly effective on adsorption were optimized for BY28 adsorption. pH = 6, 0.05 g adsorbent amount and 40 minutes of equilibrium time were obtained as equilibrium adsorption conditions. Experimental results obtained under equilibrium adsorption conditions were interpreted by comparing linearized Langmuir model ($R^2 = 0.9987$), Freundlich model ($R^2 = 0.8887$), and Dubinin-Radushkevich (D-R) ($R^2 = 0.5594$). The single layer adsorption capacity of acid activated Ca-bentonite of Keşan region was obtained as 116.3 mg / g. Gibbs free energy (ΔG°) was calculated for experiments at 25 ° C and it was concluded that the adsorption mechanism of BY28 on acid activated bentonite is a voluntary reaction.

Key Words

“Basic Yellow 28, acid activated bentonite, adsorption”

1. Giriş

Günümüz teknoloji çağı enerji ve su kaynaklarını tehdit eder hale gelmiştir. Yeşil kimya uygulamaları ile çevreyi koruma politikası benimseyen sürdürülebilir teknolojik süreçlerin tasarlanması ve endüstriyel uygulamaları hedeflenmektedir (Clark vd. 2013). Ancak, nüfusun hızla artması, mevcut kaynakların artan talebi karşılayacak oranda kullanılması ve entegre atık yönetiminin uygulanmaması çevre kirliliği nedenleri arasında sayılabilir. Sanayi yoğun bölgelerin en büyük sorunu olan çevre kirliliğinin gözlemlendiği ana faktör ise su kirliliği olarak karşımıza çıkmaktadır (Jadhav & Phugare, 2012). Atık sular organik bileşikler, karbonhidratlar, yağlar, proteinler ve üre gibi farklı seviyelerde ve özellikle kirleticiler içermektedir (Gönüllü, T. 2004).

Sentetik boyar maddelerin yoğun olarak kullanıldığı tekstil endüstrisi, su kirliliğine sebep olan en büyük endüstri kollarının başında gelmektedir. Boyama prosesinde kullanılan boyar maddelerin yaklaşık %20-40'ını içeren tekstil atık suları çoğunlukla renklidir (Kooli vd. 2019). İşlem basamakları sonucu kimyasal katkılarla dolu hale gelen tekstil atık suları, boya ve transfer maddelerini içermektedir. Boyar madde olarak kullanılan 3.200 azo boyaların 130'unun bozunma işlemi sırasında kanserojen aromatik aminler oluşturduğu bilinmektedir (Dawood & Sen, 2014). Ayrıca, atık sularındaki boyar maddeler güneş ışığının geçişine engel olduğu için fotosentezi engelleyerek ötrofikasyona yol açmaktadır.

Yer altı içme suyu rezervlerimizin korunması amacıyla da asidik, bazik, dispers, azo gibi çeşitleri bulunan boyar madde içeren atıkların kontrollü bir şekilde bertaraf edilmesi önemlidir. Bu boyaların kimyasal yapısı nedeniyle fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemlerle parçalanmaya dayanıklıdır. Ayrıca bu işlemler esnasında az miktarda da olsa toksik ve kanserojen ürünler ortaya çıkabilmektedir (Turabik, M. 2008).

Büyük hacimli atık sularındaki boyar maddelerin giderimi için adsorpsiyon (Olgun & Atar 2009), iyon değişimi; Levchuk vd. (2018), koagülasyon; Wang vd. (2005), membran filitasyonu; Madsen, H.T. (2014), aerobik ve anaerobik arıtma; Mattiasson vd. (2011) gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında adsorpsiyon nispeten daha pratik, verimli ve ekonomik olması nedeniyle yaygın olarak uygulanmaktadır (Obiageli, 2016). Adsorbant olarak aktif karbon, polimerik ve oksidik adsorbantlar, sentetik zeolitler ve doğal adsorbantlar; Worch, E. (2012) kullanılmaktadır. Doğal adsorbantlar sınıflandırılmasına mensup olan killerden bentonit (montmorillonit), ülkemizde yaygın olarak bulunmaları ve düşük maliyetleri ile özel bir konuma sahiptir. Bentonitler alkali (sodyum) bentoniti, yarı alkali (sodyum-kalsiyum) bentoniti ve toprak alkali (kalsiyum) bentoniti; Avcı, S.B (2009) olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadır.

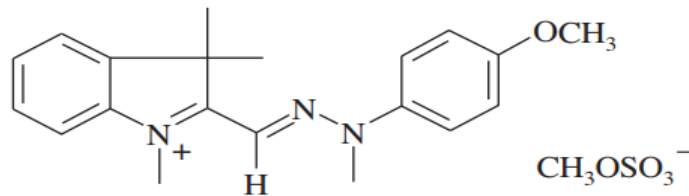
Doğal bentonitler adsorplama yeteneğini arttırmak için çeşitli yöntemler kullanılarak modifiye edilmektedirler. Kullanılan yöntemler arasında sodayla (Huang vd., 2017), çeşitli asitlerle ve EDTA (Etilen diamin tetraasetik asit) (Castro vd., 2018) ile aktive edilmesi sayılabilir. Bununla birlikte asitle aktive edilmiş bentonit killerinin yüzey alanının çok daha büyük olması ve büyük moleküllü boyar maddeleri daha kolay adsorplamaları, adsorbant olarak seçilmelerine neden olmaktadır (Javed vd., 2018).

Sunulan çalışmada atık sularından Bazik Sarı 28 (BY28) adıyla bilinen katyonik yapıya boyar maddenin, H₂SO₄ ile aktive edilmiş Keşan yöresi Ca-bentoniti ile adsorpsiyonu incelenmiştir. Adsorpsiyon çalışmalarına yön veren başlangıç pH'sının, denge süresinin ve optimum adsorbant miktarının belirlenmesi, başlangıç boyar madde konsantrasyonu değişimiyle adsorpsiyon prosesi verimi ve kapasitesinin incelenmesi konularında literatürdeki kısıtlı araştırmaların boşluklarını doldurmak amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Method

2.1. Deneysel Çalışma Prosedürü

Bu çalışmada adsorpsiyon yöntemiyle giderilmesi amaçlanan boyar madde BY28 adıyla bilinen yapısal formül Şekil 2.1.'de gösterilen di azo yapıda boyar maddedir.



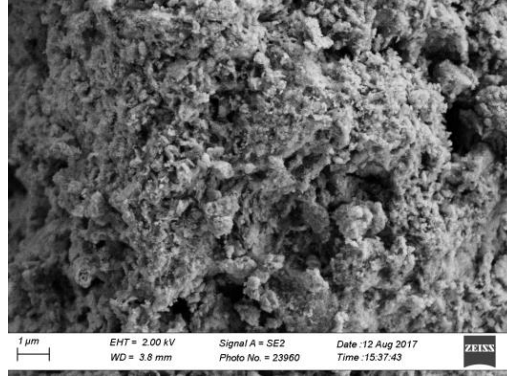
Şekil 2.1. BY28 Moleküler Yapısı (Zermane vd., 2010)

BY28'in molekül ağırlığı 433,52 g/mol ve molekül formülü C₂₁H₂₇N₃O₅S 'dür. Bazik Sarı 28, sulu çözelti içerisinde iyonize edildiğinde, pozitif yük taşır ve katyonik boya olarak adlandırılır. Fiziksel özellikleri Tablo 1.'de verilmektedir. BY28, pamuk ve poliakrilonitril boyamak için kullanılan en yaygın boya maddeleri arasındadır ve bu nedenle bilinen endüstriyel kirleticilerdir. Deneysel çalışmalarda kullanılan BY28 kodlu Bazik Sarı 28 maddesi Alptekin Boya A.Ş.'den tedarik edilmiştir.

Tablo 1. BY28 Fiziksel Özellikleri (Yener vd., 2006)

Boya özellikleri	Golden Yellow GL 200%
Renk İndeksi	Basic Yellow 28
Şekil	Toz %200, partikül %200, sıvı %20
K Değeri	3
F Değeri	0,46
Çözünürlük	363 K, 80 g/L 333 K, 60 g/L 303 K, 40g/L
pH Kararlılığı	3 ile 10 arası
λ_{max}	415 nm

Tekstil atık sularından BY28 adlı boyar maddenin giderilmesi amacıyla yapılan bu çalışmada NEDEX firmasından alınan, Keşan yöresine ait H₂SO₄ ile aktive edilmiş Ca-bentonit adsorbant olarak kullanılmıştır. Quantacherome marka Autosorb Automated Gas Sorption System ile tek standart-nokta yöntemi kullanılarak belirlenen BET yüzey alanı 300,9739 m²/ g, por çapı ise 8,2580 nm olarak ölçülmüştür. Şekil 2.2.'de ise H₂SO₄ ile aktive edilmiş Keşan yöresi bentonitine ait SEM görüntüsü yer almaktadır.

**Şekil 2.2.** H₂SO₄ İle Aktive Edilmiş Keşan Yöresi Bentonitine Ait SEM Görüntüsü

Asit aktive bentonit'in Tablo 2.'de verilen kimyasal analizi incelendiğinde kullanılan materyalin kalsiyum bentoniti olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2. Asit Aktive Bentonit (%) Kimyasal Bileşimi

Kimyasal bileşim (%)	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	TiO₂	CaO	MgO	Na₂O	K₂O	AZ.
Asit aktive bentonit	80,74	6,45	1,193	0,673	1,19	1,07	0,91	0,79	6,97

BY28'in sulu çözeltilerden adsorpsiyonunda kesikli çalışma prosedürü uygulanmıştır. Asit aktive bentonit 100 µm elekten geçirilip 100°C etüvde 45 dakika kurularak kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Denemelerde 80-120 mg/L aralığında seçilen başlangıç konsantrasyonlarının pH değerleri 0.1N NaOH ve 0.1N HNO₃ ile ayarlanmıştır. Reaksiyon 150 rpm sabit çalkalama hızında orbital çalkalayıcıda oda sıcaklığında gerçekleşmiştir. Reaksiyon sonunda oluşan katı fazın filtrasyonu amacıyla çalkalayıcıdan alınan erlenler, 45 mL'lik santrifüj tüplerine konularak 1000 rpm ve 15 dakika santrifüj ile ayırma işlemine tabi tutulmuştur.

Çözelti fazındaki BY28 konsantrasyonu spektrofotometrik ($\lambda_{max}=415\text{nm}$ dalga boyunda) olarak tayin edilmiştir. Denemelerde kullanılan cam eşyaların tümü önce temizleme asidi ile ardından da saf su ile muamele edilerek kullanılmıştır.

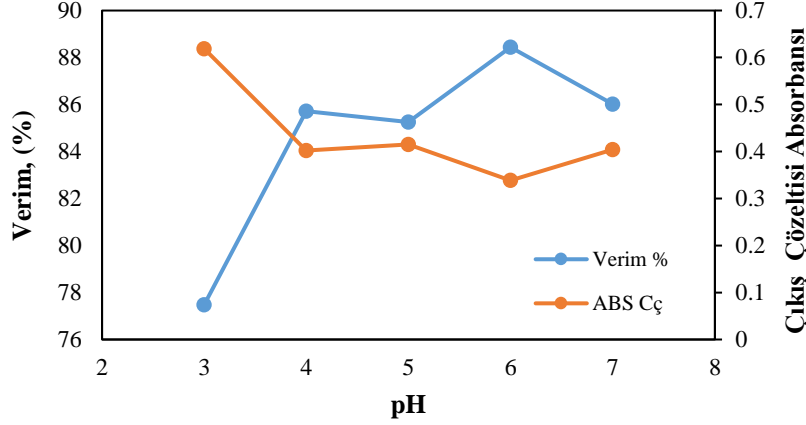
2.2 Kullanılan Cihazlar

Asit aktive bentonit 100µm altına elenerek kullanılmıştır. Ca-bentonitin serbest nemi Binder marka etüv kullanılarak uzaklaştırılmıştır. Denemeler için gerekli tartımlar Ohaus marka AS 200 model 0,1 mg hassasiyete sahip olan hassas teraziye gerçekleştirilmiştir. pH ayarlamalarını ve ölçümlerini gerçekleştirmek üzere WTW model pH metre kullanılmıştır. Reaksiyon 150 rpm sabit çalkalama hızında Wise Shake marka orbital çalkalayıcıda oda sıcaklığında gerçekleşmiştir. Süspansiyon çözeltisindeki faz ayrımını gözlemleyebilmek amacıyla NÜVE marka NF-400 model 1500 devir/dak kapasiteli santrifüj kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan katyonik yapılı BY28 boyar maddesinin konsantrasyonu Perkin Elmer marka Lambda 35 model UV-Vis spektrofotometresi ile ölçülmüştür.

3. Bulgular

3.1 Adsorpsiyon Kapasitesine pH'ın Etkisi

Çözelti pH'ı, boyar maddenin seçilen adsorbant üzerine adsorpsiyonunda önemli bir etkiye sahiptir. BY28'in asit aktive bentonit üzerine adsorplanma koşullarını optimize etmek amacıyla pH 3-7 aralığında hazırlanan çözeltilerin (%) verim ve çıkış çözeltisi absorbansı değişimi incelenmiştir. Bu amaçla, 100 mg/L başlangıç konsantrasyonda numuneler hazırlanıp 0,05 gram asit aktive bentonit ile 30 dakika temas süresinde ve 150 rpm karıştırma hızında reaksiyona sokulup çıkış çözelti konsantrasyonu spektrofotometre ile ölçülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalarda pH değişiminin verim üzerindeki etkisi Şekil 3.1.'de verilmektedir.

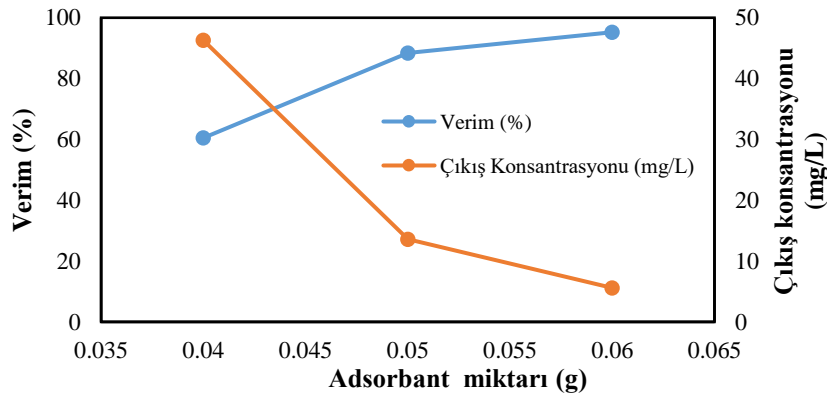


Şekil 3.1. pH'a Bağlı Çıkış Çözeltisi Absorbansı Ve Adsorpsiyon Verimleri
(T = 25 °C, karıştırma hızı = 150 rpm)

Düşük pH değerlerinde ortam pozitif yükler açısından zengin olduğu için katyonik yapılı boyar madde ile yüzey yükü pozitif olan asit aktive bentonit arasında elektrostatik bir itme meydana gelir. Çözelti pH'ının artışına paralel olarak ortamda OH⁻ iyonları artışı meydana gelmekte ve adsorbant yüzeyindeki H⁺ iyonları kademeli olarak azalmaktadır. Yüzey negatif yüklenmekte ve buna bağlı olarak asit aktive bentonitin yüzeyi ile BY28 arasında elektrostatik çekim artmaktadır (Pawar vd., 2016). Şekil 3.1. incelendiğinde adsorpsiyon verimi pH 3-6 değerleri aralığında belirli miktarda artış gösterirken, 6-7 aralığında düşüş göstermektedir. Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi, pH 6 iken %88,44 ile en yüksek (%) verim ve 0,33845 ile en düşük absorbans (ki bu değer 13,6 mg/L ile en düşük çıkış çözeltisi konsantrasyonuna karşılık gelmektedir) değeri elde edilmiştir. Bu durum BY28'in asit aktive bentonit üzerinde adsorpsiyon mekanizmasının pH ile kontrol edilebilirliğini göstermektedir.

3.2 Adsorpsiyon Kapasitesine Adsorbant Miktarının Etkisi

Asit aktive bentonitin adsorbant olarak kullanıldığı bu çalışmada pH'ı 6'ya ayarlanmış 100 mg/L BY28'in 30 dakika süreyle 150 rpm karıştırma hızında 0,04-0,06 g arasında değişen Ca-bentonit miktarlarıyla reaksiyona sokularak alıkonma veriminin adsorbant miktarı ile değişimi incelenmiştir. Şekil 3.2.'de adsorpsiyon sonunda elde edilen verim ve çıkış konsantrasyonlarının bentonit miktarına karşı çizilen grafiği yer almaktadır.



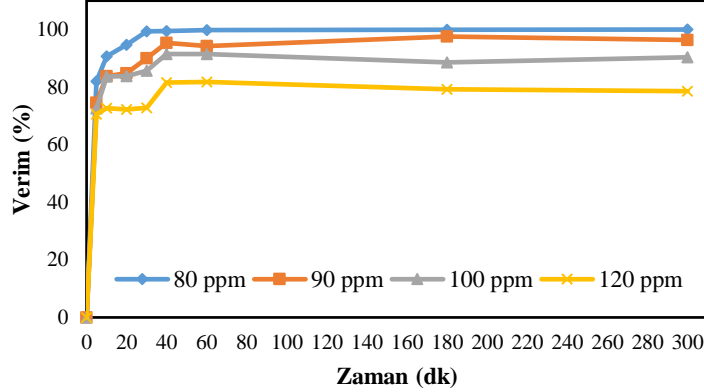
Şekil 3.2. Adsorbant Miktarının Verim Ve Çıkış Konsantrasyonuna Etkisi

Asitle aktive bentonitin ham bentonite göre daha yüksek (%) verime sahip olduğu literatür incelemesi ile tespit edilmiştir (Javed vd., 2018). Yapılan çalışmada bentonit miktarı artışıyla birlikte meydana gelen verim artışı oldukça yüksektir. 0,06 g adsorbant miktarı ile en yüksek verim olan %95 ve 5,6 mg/L ile en düşük çıkış konsantrasyonu elde edilmiştir. Elde edilen veriler göz önüne alındığında, adsorpsiyon kapasitesi artışının, adsorbant miktarının artmasıyla mevcut yüzey alanının artması ve daha fazla adsorpsiyon bölgesinin mevcut olmasının bir sonucu olarak meydana geldiği sonucuna varılmıştır.

Sonraki çalışmalarda optimum adsorbant miktarı olarak 0,04 g alınmıştır. Bunun sebebi ise 0,06g alınarak 100 mg/L BY28'in 30 dakika süreyle reaksiyonu sonucunda %95 verim elde edilmesinin kinetik çalışmalar için çalışma zorluğu getireceğidir.

3.3 Adsorpsiyon Kapasitesine Temas Süresinin Etkisi

Temas süresinin adsorpsiyon kapasitesine olan etkisini incelemek amacıyla başlangıç boyar madde konsantrasyon değerleri olarak 80, 90, 100 ve 120 mg/L için 0,04 gram asit aktive bentonit kullanılarak, pH 6 ve 150 rpm karıştırma hız koşullarında 15-300 dakika temas süresi aralığında çalışma gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3.'de zamana karşılık değişen konsantrasyon değerlerinin adsorpsiyon verimine etkisi görülmektedir.

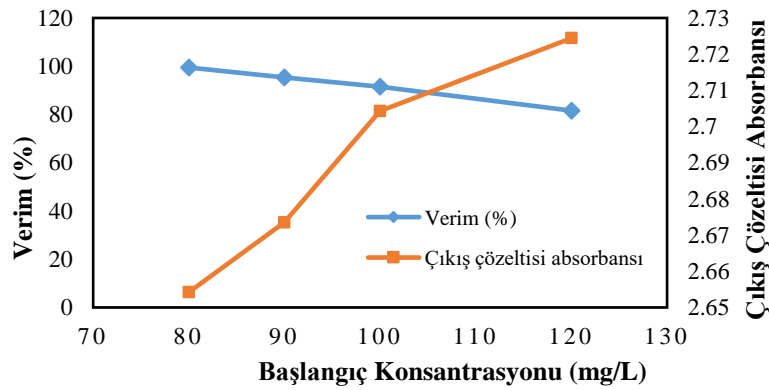


Şekil 3.3. Temas Süresinin Adsorpsiyon Verimine Etkisi

Çalışılan konsantrasyonlarda 40 dakikaya kadar artan temas süresiyle verimde artış görülmektedir. Ancak 40 dakikadan sonra artan temas süresiyle verimde çok az değişiklik meydana geldiği görülmektedir. Bu nedenle çalışmanın 40 dakika temas süresinde dengeye geldiği sonucuna varılmıştır. 40 dakika temas süresi için 80, 90, 100 ve 120 mg/L için elde edilen verim değerleri sırasıyla %99,45, %95,37, %91,50, %81,57 'dir.

3.4 Adsorpsiyon Kapasitesine Başlangıç Konsantrasyonunun Etkisi

BY28 boyar maddesinin 80-120 mg/L aralığı başlangıç konsantrasyonu olarak seçilerek optimum pH olarak belirlenen pH=6 değerinde denge temas süresi olan 40 dakika boyunca 150 rpm karıştırma hızında 0,04 gram asit aktive bentonit ile reaksiyonu incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.4.'te verilen giriş konsantrasyonu değişimi ile (%) verim ve absorbans değerleri değişimi grafiğinde yer almaktadır.



Şekil 3.4. Denge zamanı olan 40 dakikada çözelti başlangıç konsantrasyonunun adsorplanan madde miktarına etkisi

Şekil 3.4.'de verilen deney sonuçları incelendiğinde boyanın başlangıç konsantrasyonunun 80 mg/L'den 120 mg/L'ye artması ile adsorpsiyon verimi %95,45'den %81,57'ye düştüğü gözlenmektedir. Düşük konsantrasyonlarda yüzey kütle transferi nedeniyle boyanın adsorpsiyonu hızla ilerlemektedir. Adsorbant yüzeyindeki boş alanların bağlanma kapasitesi giriş çözelti konsantrasyonu artışı ile azalmaktadır. Boya giriş konsantrasyonunun artması ile boya molekülleri arasındaki rekabet artmakta bu durumun sonucu olarak konsantrasyon gradyentinin itici gücü düşmektedir. Bu durum ise boya giderim veriminin düşmesine neden olmaktadır (Boudechiche vd., 2019).

3.5 Denge Adsorpsiyon İzotermi

Buhar yada çözelti fazındaki bir kimyasal türün (adsorbat), bir katı maddenin (adsorbantın) yüzeyi veya gözeneklerinin üzerindeki konsantrasyonuyla karakterize edilen bir yüzey olgusu olan adsorpsiyon, adsorpsiyon izotermi kullanılarak karakterize edilir. Denge Adsorpsiyon İzotermi adsorbantın adsorbat ile nasıl etkileşimde bulunduğunu açıklamakta ve kullanılan adsorbantın kapasitesi konusunda yorum yapılmasına yardımcı olmaktadır. Bir başka deyişle, adsorpsiyon dengesi çalışmaları sıvı fazdaki denge adsorpsiyon kapasitesini q_e (mg/g) ve denge çıkış konsantrasyonunu (C_e) ilişkilendirmek için kullanılmaktadır (Amin vd., 2015).

BY28 boyar maddesinin asit aktive Ca-bentoniti üzerine adsorpsiyon davranışı Langmuir, Freundlich, Dubinin–Radushkevich (D–R) gibi iki parametrelili izoterm modelleri kullanılarak yorumlanmıştır.

Lineerleştirilmiş şekli aşağıdaki denklem ile verilen Langmuir izoterm eşitliği homojen spesifik yüzeye tek tabaka adsorpsiyonunu ifade etmektedir.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} K_L} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (1)$$

Bu eşitlikte;

q_e : Adsorbant üzerindeki denge boya konsantrasyonunun miktarı (mg/g),

C_e : Çözeltide kalan denge boya konsantrasyonu (mg/L),

q_{\max} : Tek tabaka adsorpsiyon kapasitesi (mg/g),

K_L : Langmuir adsorpsiyon sabiti (L/mg) dir.

Spesifik olmayan heterojen alanlar için geçerli olan Freundlich izotermi eşitliği ise $1/n$ heterojenlik faktörü ile karakterize edilir. Bu eşitliğin lineerleştirilmiş şekli aşağıdaki şekildedir.

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} C_e \quad (2)$$

Van der Waals kuvvetleri nedeniyle meydana gelen fiziksel adsorpsiyonun ifadesidir ve tek tabaka oluşumu ile sınırlanmaz. Tersinir bir adsorpsiyonu tanımlar. Freundlich eşitliğinde;

q_e : Adsorbant üzerindeki denge boya konsantrasyonunun miktarı (mg/g),

C_e : Çözeltide kalan denge boya konsantrasyonu (mg/L),

K_F : Freundlich sabiti (L/mg) ve

$1/n$: Heterojenlik faktörünü tanımlamaktadır.

Dubinin–Radushkevich (D–R) izotermi ise seçilen yüzeyi homojen ve adsorpsiyon potansiyelini sabit kabul etmez. Bu modele göre adsorpsiyon karakteristikleri adsorbantın gözenekli yüzeyi ile ilgilidir. Gerçekleşen adsorpsiyonun fiziksel ya da kimyasal olması ile ilgili bilgi verir (Worch, 2012). Dubinin–Radushkevich (D–R) izotermi (3) numaralı denklem ile ifade edilmektedir;

$$q = \frac{V_0}{V_m} \left(\frac{\varepsilon}{E} \right)^2 \quad (3)$$

ε , adsorpsiyon potansiyeli, 4 numara ile ifade edilen eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$\varepsilon = RT \ln \frac{C_e}{C} \quad (4)$$

Dubinin–Radushkevich (D–R) izoterm denkleminde;

E : adsorpsiyonun serbest enerjisi

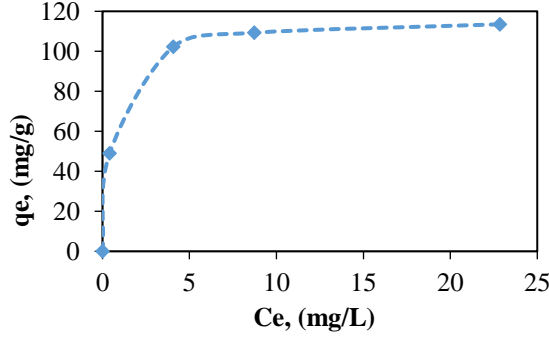
V_0 : cm^3/g

V_m : cm^3/mol

ε : adsorpsiyon potansiyelidir.

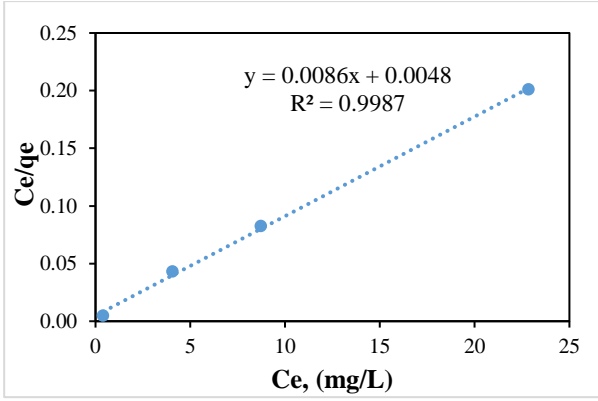
Şekil 3.5 de verilen BY28'in asit aktive bentonit üzerine adsorpsiyon izotermi; pH=6,0'da, 0,04 g sabit adsorbant miktarında ve çeşitli BY28 başlangıç konsantrasyonlarında (80, 90, 100, 120 mg/L), 40 dakika denge zamanı seçilerek oda sıcaklığında gerçekleştirilen denemelerin sonuçları incelendiğinde, Giles vd., (1960)'daki yayınlarında belirtildiği gibi L2-şekilli adsorpsiyon

izotermine uyumludur. Bu sonuç, çözücü ve boya molekülleri arasında güçlü bir rekabetin olduğu ve boya moleküllerinin asit aktive bentonit yüzeyini kapladığı şeklinde yorumlanabilir.

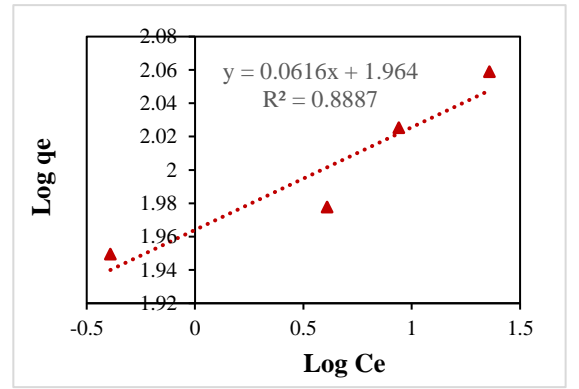


Şekil 3.5. BY28'in asit aktive bentonit üzerine adsorpsiyon izotermi

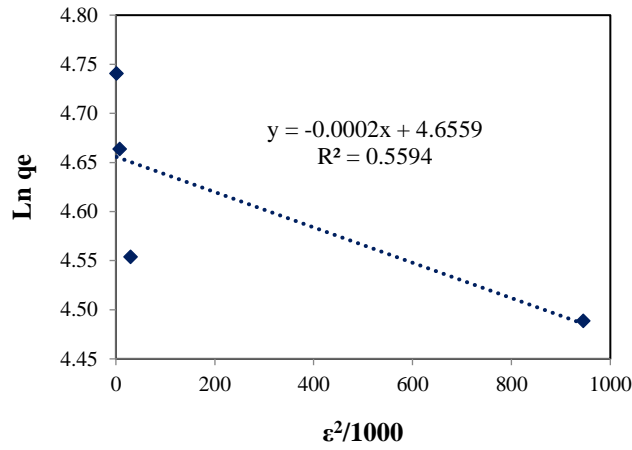
Langmuir, Freundlich ve Dubinin–Radushkevich (D–R) izotermelerinin bu çalışma için uygulanmış lineer değişimi Şekil 3.6'de verilmektedir.



a)



b)



c)

Şekil 3.6. (a)Langmuir, (b)Freundlich ve (c)Dubinin–Radushkevich (D–R) izotermeleri

Langmuir, Freundlich ve Dubinin–Radushkevich (D–R) adsorpsiyon izoterm modellerinin lineer halleri deneysel sonuçları yorumlamak üzere kullanılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 3.'de verilmiştir.

Şekil 3.6. ve Tablo 3.'e göre; denge sonuçlarından elde edilen R^2 değerleri Langmuir izotermi ile ($R^2=0,9987$) oldukça uyumlu iken Freundlich izotermi için ($R^2=0,8887$) ve Dubinin–Radushkevich (D–R) izoterm modeli için ise ($R^2=0,5594$) uyumsuzdur.

Tablo 3. Asit aktive bentonit üzerine BY28 adsorpsiyonunda izoterm parametreleri

İzoterm Modelleri	Parametreler	Değerler
Langmuir	q_{\max} (mg /g)	116,3
	K_L (L /mg)	1,79
	R^2	0,9987
Freundlich	K_F (L/g)	92,04
	n	16,23
	R^2	0,8887
Dubinin–Radushkevich (D–R)	q_{D-B} (mg/g)	105,20
	R^2	0,5594
	E (J /mol)	40,82

Freundlich adsorpsiyon kapasitesi $K_F=92,04$ L/g ve adsorpsiyon yoğunluğunu yansıtan “ $1/n$ ” değeri 0,0616 olarak hesaplanmıştır. Adsorbant yüzeyinin heterojenliğini yansıtan bu değer 0 ile 1 arasında olması asit aktive bentonit yüzeyinin etkili bir adsorpsiyon için yeterince heterojen ve büyük olduğunu ifade eder (Worch, 2012).

Lineerleştirilmiş Dubinin-Radushkevich (D–R) İzoterm modeli kullanılarak adsorpsiyonun serbest enerjisi $E = 40,82$ J/mol hesaplanmıştır. Bu değer 8 ile 16 kJ/mol arasında olması ise kimyasal adsorpsiyon olarak gerçekleştiği anlamına gelmektedir.

Ayrıca, Tablo 4. de verilmekte olan R_L katsayıları elverişlilik aralığındadır.

Tablo 4. Farklı başlangıç konsantrasyonu için ayırma faktörü

C_0 (mg/L)	80	90	100	120
R_L - BY28	0,006887	0,006131	0,005525	0,004613

4. Genel Sonuçlar

Tablo 3. incelendiğinde korelasyon katsayısının 1'e daha yakın olan Langmuir izotermine asit aktive bentonit üzerine BY28'in adsorpsiyonu için daha uygun olduğu görülmektedir. Langmuir izotermi bentonit yüzeyinin tamamen kaplanmadığı tek tabaka halinde adsorpsiyonlandığı durumlara sınırlıdır. Elde edilen sonuçlara göre adsorpsiyonu tek tabaka halinde gerçekleştiği söylenebilmektedir. Langmuir izoterminden hesaplanan K_L değeri boyanın asit aktive bentonite bağlanma ilgisini gösterir. K_L 'nin büyük bir değeri de güçlü bağlanmayı temsil eder. Ayrıca hesaplanan q_{\max} değerine bakıldığında asit aktive bentonit yüksek tek tabakalı kaplama kapasitesi göstermiştir.

Freundlich izotermine korelasyon katsayısı da yüksek bir değerdedir bu nedenle kısmen de olsa adsorpsiyonun Freundlich izotermine uygunluğu söylenebilir. Freundlich izotermine yer alan $1/n$ sabiti kullanılan adsorbantın yüzey heterojenliğini temsil eder. Hesaplanan n değeri 1'den büyüktür bu durum katyonik yapı BY28 boyar maddesinin asit aktive bentonit tarafından uygun bir şekilde adsorbe edildiğini gösterir. K_F değerinin büyüklüğü yüksek adsorpsiyon kapasitesi olan asit aktive bentonitin BY28 boyasını kolay bir şekilde adsorpladığını göstermektedir.

Adsorpsiyon mekanizmasının incelenmesi için Gibbs serbest enerji değişimi (ΔG°), entalpi değişimi (ΔH°) ve entropi değişimi (ΔS°) gibi termodinamik parametreler hesaplanarak adsorpsiyon denge sabitinin sıcaklığa karşı verdiği tepki irdelenmektedir (Bilgiç, 2013). Sabit sıcaklık ve basınç altında yapılan çalışmalarda adsorpsiyon prosesinin kendiliğinden gerçekleşip gerçekleşmediği üzerine çalışılmaktadır. Prosesin kendiliğinden gerçekleştiği negatif ΔG° değerine ulaşılarak belirlenebilmektedir (Koçkaya, 2016).

Gibbs serbest enerji değişimi reaksiyonun kendiliğinden gerçekleşmesinin temel kriteridir. Tablo 5'de verilen her bir konsantrasyon için hesaplanan ΔG° değeri negatif değerdedir. Bu adsorpsiyonun oda sıcaklığı olan 25 °C 'de kendiliğinden gerçekleştiğinin kanıtıdır. Adsorpsiyon denge sabiti $K = C_{ads}/C_e$ olarak tanımlanır. C_{ads} , denge temas süresinde çözeltinin litre başına adsorbantına adsorbe edilen boya (mg) miktarıdır ve C_e denge konsantrasyonudur (Turabik, 2008). Değişen giriş konsantrasyonuna karşılık Gibbs serbest enerjisi ve denge sabiti değişimi Tablo 5.'de verilmektedir.

Tablo 5. Değişen giriş konsantrasyonuna karşılık Gibbs serbest enerji değişimi

Konsantrasyon (mg/L)	K	ΔG° (J/mol)
80	192,4018	-13031,00
90	17,8363	-7138,47
100	10,7624	-5886,85
120	4,5873	-3774,08

Adsorpsiyonun denge sabiti K' 'nin boyar madde giriş konsantrasyonu ile artmaktadır, modifiye killer ile yapılan çalışmalar incelendiğinde çözünen maddenin başlangıç konsantrasyonunun " K " parametresinin değeri üzerinde etkili olduğu sonucu çıkmaktadır. K parametresinin değeri yığın çözelti içerisindeki çözünenin başlangıç konsantrasyonunun artmasıyla düşmektedir (Ismadji & Soetaredjo & Ayucitra, 2015). Tüm konsantrasyonlar için katyonik yapıyla BY28 boyar maddesinin asit aktive bentonit üzerine adsorplanması kendiliğinden gerçekleşen istemli bir reaksiyon olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada BY28 adsorpsiyonu için çalışılan diğer adsorbanların q_{max} (mg/g) değerleri Tablo 6.'da karşılaştırılmıştır ve asit aktive bentonitin BY28 adsorpsiyonu için iyi bir adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu söylenebilir.

Tablo 6. Çeşitli adsorbantlar için BY28'in maksimum adsorpsiyon kapasiteleri (q_{max})

Adsorbant	q_{max} (mg/g)	pH	Referans
Keşan yöresi asit aktive Ca-Bentonit	116,3	6	Sunulan çalışma
Klinoptilolit	59,6	6-6,5	(Yener vd., 2006)
Amberlit XAD-4	14,9	6-6,5	(Yener vd., 2006)
Bor endüstrisi atıkları	75,0	9	(Olgun & Atar, 2009)
Bentonit	256,4	8	(Turabik, 2008)
Yeşil algler	27,0	8	(Gupta & Suhas, 2009)

Sunulan çalışma 25°C oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup giriş ve çıkış konsantrasyonları için pH değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen çıkış pH değerleri 6-7 aralığında bulunmuştur. Bu değer aralığı boyar madde içeren atık suların çevreye bırakılması için gerekli olan pH ve sıcaklık standart değeri aralığındadır.

Kaynaklar

Amin, M. T., Alazba, A. A., & Shafiq, M. (2015). Adsorptive Removal of Reactive Black 5 from Wastewater Using Bentonite Clay: Isotherms, Kinetics and Thermodynamics, *Sustainability*, 7, 15302-15318.

Avcı, S. B. (2009). Soda Ve Mgo İle Aktiflendirilmiş Aratıp Bentonitlerin Sondaj Ve Döküm Bentoniti Karakteristiklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Bilgiç, Ö. (2013). Akrilik Asit Fonksiyonel Grupları İçeren Çapraz Bağlı Kopolimer Kullanarak Sulu Çözeltilerden Sr(II) Uzaklaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

Boudechiche, N., Fares, M., Ouyahia, S., Yazid, H., Trari M., & Sadaoui, Z. (2019). Comparative Study on Removal of Two Basic Dyes in Aqueous Medium by Adsorption Using Activated Carbon from Ziziphus Lotus Stones. *Microchemical Journal*, 146, 1010–1018.

Castro, M., Abad, M., Sumalinog, D., Abarca, R., Paoprasert, P., Luna, M. (2018). Adsorption of Methylene Blue dye and Cu (II) ions on EDTA-modified bentonite: Isotherm, kinetic and thermodynamic studies. *Sustainable Environment Research*, 28, 197-205. doi:10.1016/j.serj.2018.04.001

Clark, J., Macquarrie, D., Gronnow, M., & Budarin V. (2013). *Green Chemistry Principles*. K. Boodhoo, (Ed.), Process Intensification for Green Chemistry (33-55). England: John Wiley & Sons, Ltd.

Dawood, S., & Sen, T.K. (2014). Review on Dye Removal from Its Aqueous Solution into Alternative Cost Effective and Non-Conventional Adsorbents. *Journal of Chemical and Process Engineering*, 1: 104, 1-11.

Giles C. H., MacEwan, T. H., Nakhwa S. N., & Smith D. (1960). *Studies in Adsorption*. Part XI. A System of Classification of Solution Adsorption Isotherms and Its Use in Diagnosis of Adsorption Mechanisms and In Measurements of Specific Surface Areas of Solids, 3973–3993.

Gönüllü, T. (2004). Endüstriyel İşlemler. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü (13-29). İstanbul: Birsen Basın Yayın.

Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal a review. *Journal of Environmental Management*, 90, 2313–2342. doi:10.1016/j.jenvman.2008.11.017

Huang, Z., Li, Y., Chen, W., Shi, J., Zhang, N., Wang, X., Li, Z., Gao, L., & Zhang, Y. (2017). Modified bentonite adsorption of organic pollutants of dye wastewater. *Materials Chemistry and Physics*, 202, 266-276. doi:10.1016/j.matchemphys.2017.09.028

- Ismadji, S., Soetaredjo, E., F., & Ayucitra, A. (2015). Clay Materials for Environmental Remediation, Green Chemistry for Sustainability (113-118). London, Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht.
- Jadhav, J., & Phugare, S. (2012). Textile Dyes: General Information And Environmental Aspects. A. Nemr, (Ed.), Non-Conventional Textile Waste Water Treatment (1-29). United States: Nova Science Publications.
- Javed, S., Zahir, A., Khan, A., Afzal, S. & Mansha, M. (2018). Adsorption Of Mordant Red 73 Dye On Acid Activated Bentonite: Kinetics And Thermodynamic Studies. *Journal of Molecular Liquids*, 254, 398–405. doi:10.1016/j.molliq.2018.01.100
- Koçkaya, G. (2016). Anilin Mavisinin Atıksulardan Uzaklaştırılmasında Yeni Bir Adsorbent Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kooli, F., Liu, Y., Abboudi M., Hassani, H.O., Rakass, S., Ibrahim, S.M., & Al Wadaani, F. (2019). Waste Bricks Applied as Removal Agent of Basic Blue 41 from Aqueous Solutions: Base Treatment and Their Regeneration Efficiency, *Applied Sciences*, 9, 1237. doi:10.3390/app9061237
- Levchuk, I., Marquez, J. & Sillanpaa, M. (2018). Removal of natural organic matter (NOM) from water by ion exchange - A review. *Chemosphere* 192, 90-104.
- Madsen, H. T. (2014). Chemistry of Advanced Environmental Purification Processes of Water, Chapter 6. Membrane Filtration in Water Treatment (199-248). Elsevier.
- Mattiasson, B., Murto, M., Kumar, N. & Jonstrup, M. (2011). Sequential Anaerobic–Aerobic Treatment Of Azo Dyes: Decolourisation And Amine Degradability. *Desalination*, 280, 339-346.
- Obiageli, A. (2017). Adsorption Of Cationic Dye Onto Low-Cost Adsorbent Synthesized From Bentonite Clay Part I. Kinetic And Thermodynamic Studies. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 52, 3, 491-504.
- Olgun, A., & Atar, N. (2009). Equilibrium and kinetic adsorption study of Basic Yellow 28 and Basic Red 46 by a boron industry waste. *Journal of Hazardous Materials*, 161, 148–156. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.03.064
- Pawar, R., Gupta, P., Lalmunsiama, Bajaj, H., & Lee, S. (2016). Al-Intercalated Acid Activated Bentonite Beads For The Removal Of Aqueous Phosphate. *Science of the Total Environment*, 572, 1222–1230. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.08.040
- Turabik, M. (2008). Adsorption Of Basic Dyes From Single And Binary Component Systems Onto Bentonite: Simultaneous Analysis Of Basic Red 46 And Basic Yellow 28 By First Order Derivative Spectrophotometric Analysis Method. *Journal of Hazardous Material*, 158, 52-64. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.01.033
- Wang, L., Hung, Y., Shammass, N. (2005). *Physicochemical Treatment Processes*. New Jersey: Humana Press Inc
- Worch, E. (2012). *Adsorption Technology in Water Treatment; Fundamentals, Proc. and Mod.*, Dresden-Germany.
- Yener, J., Kopaç, T., Doğu, G., & Doğu, T. (2006). Adsorption of Basic Yellow 28 from aqueous solutions with clinoptilolite and amberlite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 294, 255-264. doi:10.1016/j.jcis.2005.07.040
- Zermane, F., Bouras, O., Baudu, M., & Basly, J. (2010). Cooperative coadsorption of 4-nitrophenol and basic yellow 28 dye onto an iron organo-inorgano pillared montmorillonite clay. *Journal of Colloid and Interface Science*, 350, 315–319. doi:10.1016/j.jcis.2010.06.040



Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Gecikme Duyarlı CSMA Ortam Erişim Tekniğinin Performans Değerlendirmesi

Performance Evaluation of Delay Sensitive CSMA Medium Access Technique for Wireless Sensor Networks

Muhammed Enes Bayrakdar¹

¹Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 81620 Konuralp, Düzce, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 31/07/2019

Kabul / Accepted: 1/11/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Kablosuz algılayıcı ağ ortamları, kablolu iletişim ile karşılaştırıldığında genellikle esneklik avantajı nedeniyle tercih edilmektedir. Bu makalede, kablosuz algılayıcı ağlar için gecikme duyarlı CSMA ortam erişim tekniğinin performans değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Kablosuz algılayıcı düğümler, sınırlı enerjiye sahip olduklarından dolayı kayıpsız veri iletişimi için CSMA ortam erişim tekniğini kullanmaktadırlar. Enerji verimliliğini artırmak amacıyla, kablosuz algılayıcı düğümler boşa iken uyku durumuna geçerek bekleme yapmaktadırlar. Analitik modelin matematiksel olarak elde edilmesinden sonra, kablosuz algılayıcı ağ yapısının benzetim modeli Riverbed yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Kablosuz algılayıcı ağın performansını analiz etmek için; gecikme, enerji ve iş çıkarma oranı parametreleri incelenmiştir. Performans değerlendirilmesi sonuçları incelendiğinde, CSMA tekniği sayesinde ortalama gecikmenin önemli derecede düşürüldüğü görülmektedir. Ayrıca, enerji tüketimi makul düzeyde tutularak kablosuz algılayıcı düğümler sayesinde maksimum iş çıkarma oranı elde edilmektedir.

Anahtar Kelimeler

“Algılayıcı Ağ, CSMA, Gecikme, Kablosuz Haberleşme”

Abstract

Wireless sensor network environments are generally preferred because of their flexibility advantage when compared to wired communication. In this article, performance evaluation of delay sensitive CSMA medium access technique for wireless sensor networks was performed. Because wireless sensor nodes have limited energy, they utilize CSMA medium access technique for lossless data communication. In order to increase energy efficiency, the wireless sensor nodes get into the sleep state when they wait in idle state. After obtaining the analytical model mathematically, the simulation model of the wireless sensor network was designed using Riverbed software. To analyze the performance of the wireless sensor network; the parameters of delay, energy and throughput rate were investigated. When the performance evaluation results are analyzed, it is seen that the average delay is decreased significantly by CSMA technique. In addition, the maximum throughput rate is achieved with the help of wireless sensor nodes keeping the energy consumption at a reasonable level.

Key Words

“Sensor Network, CSMA, Delay, Wireless Communication”

1. Giriş

Kablosuz algılayıcılarda 1978'den bu yana yaşanan teknolojik gelişmeler neticesinde, kablosuz sistemler çevre koşullarını izleyen algılayıcı ağlarda veri iletimi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Al-Mamun vd, 2010). Kablosuz sistemlerin kullanımının birçok nedeni vardır (Mahlknecht&Bock, 2004). En önemli nedenleri ise; düşük maliyet, düşük güç tüketimi, veri işleme, kablosuz iletişim kapasitesi, sınırlı ekipman kullanımı ve küçük algılayıcı düğümlerdir (Bertocco vd, 2007). Bu özelliklerden dolayı kablosuz iletişim yapan algılayıcı düğümler, gözlem ve veri aktarımı alanında önemli bir yere sahiptir (Dahham vd, 2012). Çünkü kablolu sistemlerin; kablo kopmaları, yüksek kablo maliyetleri ve yüksek güç tüketimi gibi birçok problemleri bulunmaktadır (Shrestha vd, 2013). Kablosuz algılayıcı ağlarda bu tür problemler bulunmadığı için, genellikle akademik veya ticari amaçlarla tercih edilmektedirler (Haghighi vd, 2011).

CSMA tekniğinin temeli olan taşıyıcı sezme, kablosuz ağlarda çekişme çözümü için yaygın olarak kullanılmaktadır (Shu vd, 2006). Düğümlerin eşzamanlı iletimlerini tespit ederek çarpışmayı önlemelerini sağlamaktadır (youn vd, 2007). Birçok kablosuz algılayıcı ağ platformunda, taşıyıcı sezme temel olarak net kanal değerlendirme yöntemiyle gerçekleştirilmektedir (Collotta vd, 2013).

Net kanal değerlendirme genellikle, taşıyıcı frekanstaki enerji seviyesini ölçen ve belirli bir eşikle karşılaştıran fiziksel katmanın bir özelliği olarak karşımıza çıkmaktadır (Shukla vd, 2009). Kablosuz algılayıcı ağlarda çok sayıda ortam erişim tekniği önerilmesine rağmen, taşıyıcı sezme en temel çekişme çözüm aracı olmaya devam etmektedir (Achir&Ouvry, 2005). Pek çok ortam erişim tekniği, veri iletimi için taşıyıcı sezme kullanılmaktadır (Lenka vd, 2016).

Literatürde, CSMA tekniği ile ilgili olarak yapılan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Agbota, çekişme seviyesine göre tezat bağlantı özelliklerini zıt kılan iki paket alım alanını deneysel olarak tanımlamıştır (Agbota, 2010). Rehman ve arkadaşları, pille çalışan kablosuz algılayıcı ağlar için olasılık tabanlı yoklama protokolünün performansını incelemişlerdir (Ur Rehman vd, 2014). Waghole ve Deshpande, algılayıcı ağların çeşitli hizmet kalitesi parametreleri için CSMA ve TDMA tekniklerinin performansını incelemişlerdir (Waghole&Deshpande, 2014). Zhao ve arkadaşları, üç farklı durumdaki algılayıcı düğüm enerji modelini temel alan yeni bir çapraz katman enerji modeli önermişlerdir (Zhao vd, 2010).

Bu makale çalışmasında, kablosuz algılayıcı ağlar için gecikme duyarlı CSMA ortam erişim tekniğinin performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Kablosuz algılayıcı düğümler, sınırlı enerjiye sahip olduklarından dolayı kayıpsız veri iletişimi için CSMA ortam erişim tekniğini kullanmaktadırlar. Enerji verimliliğini artırmak amacıyla, kablosuz algılayıcı düğümler boştaki uykuya geçerek bekleme yapmaktadırlar.

Analitik modelin matematiksel olarak elde edilmesinden sonra, kablosuz algılayıcı ağ yapısının benzetim modeli Riverbed yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Kablosuz algılayıcı ağın performansını analiz etmek için; gecikme, enerji ve iş çıkarma oranı parametreleri incelenmiştir. Performans değerlendirmesi sonuçları incelendiğinde, CSMA tekniği sayesinde ortalama gecikmenin önemli derecede düşürüldüğü görülmektedir. Ayrıca, enerji tüketimi makul düzeyde tutularak kablosuz algılayıcı düğümler sayesinde maksimum iş çıkarma oranı elde edilmektedir.

Bu çalışmanın özgünlüğü, kablosuz algılayıcı ağlar için gecikmeyi en aza indirmeyi hedefleyen ortam erişim tekniği tasarlamak ve tasarlanan tekniğin performans değerlendirmesini Riverbed benzetim yazılımı ortamında yapmaktır.

2. Materyal ve Metot

Bu makale çalışmasında, buldukları zorlu konumlarından dolayı yeniden enerji depolanması mümkün olmayan algılayıcı düğümleri için kablosuz algılayıcı ağ ortamı incelenmiştir. Kablosuz algılayıcı düğümler, verilerini kendilerine en yakın olan toplayıcı istasyona iletmektedirler. Verilerin doğrudan toplayıcı istasyona aktarılması mümkün değilse, verilerini diğer algılayıcı düğümler aracılığıyla toplayıcı istasyona iletmektedirler. Ağ yapısındaki kablosuz algılayıcı düğümler paket çarpışmalarını önlemek amacıyla CSMA tekniğini kullanmaktadır.

Kablosuz algılayıcı ağ ortamında; herhangi bir çarpışma olmadan sürekli veri iletimi sağlanarak, enerji tüketimi en aza indirilmektedir. Ayrıca, ağda bulunan algılayıcı düğümler tam kapasite kullanılarak ağın iş çıkarma oranı performansı maksimum düzeye çıkarılmaktadır. Algılayıcı düğümlerin beklerken uykuya geçmesi ve çarpışmaların önlenmesi sayesinde, ağın ortalama gecikmesi kabul edilebilir bir seviyede tutulmaktadır.

2.1. Önerilen Yaklaşımın Analitik Modeli

CSMA (Taşıyıcı Sezme Çoklu Erişim) tekniğinin normal yayılım süresi, a , aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$a = \frac{\tau}{T} \quad (1)$$

Denklem (1)'de; T başarılı iletim periyodunu, τ ise başarısız iletim periyodunu temsil etmektedir. Ağ yükünü, G , hesaplamak için; sunulan yük λ ve başarılı iletim periyodu çarpılmaktadır.

$$G = \lambda T \quad (2)$$

Başarılı paket iletim olasılığı (3)'deki gibi elde edilmektedir.

$$Obas = e^{-(\lambda\tau)} \quad (3)$$

CSMA tekniğinin iş çıkarma oranı, S, (4)'deki gibi bulunmaktadır.

$$S = \frac{G(e^{-(aG)})}{G(1 + 2a) + (e^{-(aG)})} \quad (4)$$

Gerekli değişken düzenlemelerini yaptıktan sonra, iş çıkarma oranı (5)'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$S = \frac{\lambda T(e^{-(\lambda\tau)})}{\lambda(T + 2\tau) + (e^{-(\lambda\tau)})} \quad (5)$$

CSMA tekniğinin gecikme denklemi, D, (6)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$D = CS(Tgc + Tcb + Tcm) + (Tgc + T) \quad (6)$$

Denklem (6)'da; CS çarpışma sayısını, Tgc ortalama geri çekilme süresini, Tcb çarpışma bekleme süresini, Tcm çarpışma meşgul süresini ifade etmektedir. CSMA tekniğinin enerji tüketimi denklemi, E, (7)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$E = Eks + Evi + Eyg + Ebil \quad (7)$$

Denklem (7)'de; Eks kanal sezme enerji tüketimini, Evi veri iletimi enerji tüketimini, Eyg yayılım gecikmesi enerji tüketimini, Ebil ise bildirim paketi enerji tüketimini temsil etmektedir.

$$S = \frac{\lambda T(Obas)}{\lambda(T + 2\tau) + (Obas)} \quad (8)$$

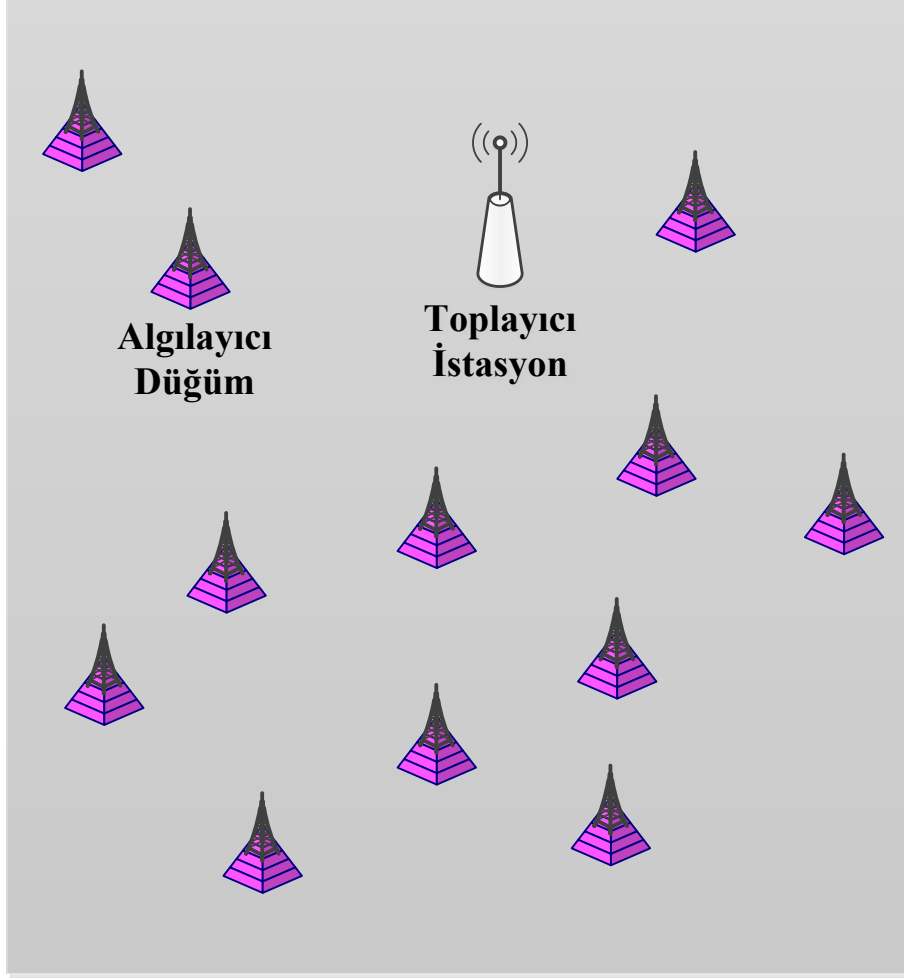
Denklem (8)'de; başarılı paket iletim olasılığı, Obas, değerinin yerine yazılmasıyla elde edilen iş çıkarma oranı denklemi verilmektedir.

$$D = CS(Tgc) + CS(Tcb) + CS(Tcm) + Tgc + T \quad (9)$$

Denklem (9)'da; çarpışma sayısı, CS, değerinin parantez içerisine çarpılmasıyla elde edilen önerilen gecikme denklemi verilmektedir.

2.2. Önerilen Yaklaşımın Benzetim Modeli

Şekil 1'de, kablosuz algılayıcı ağ ortamı gösterilmektedir. Algılayıcı ağ ortamında; kablosuz algılayıcı düğümler ve toplayıcı istasyon bir arada bulunmaktadır. Toplayıcı istasyonun görevi, kablosuz algılayıcı düğümler tarafından sezilen verileri toplamaktır. Toplayıcı istasyondan uzaktaki kablosuz algılayıcı düğümler verilerini diğer düğümlerin yardımıyla da iletebilmektedirler. Kablosuz algılayıcı düğümler, boşta iken uykuda bekleyerek mümkün olan en düşük enerjiyi tüketmektedirler.

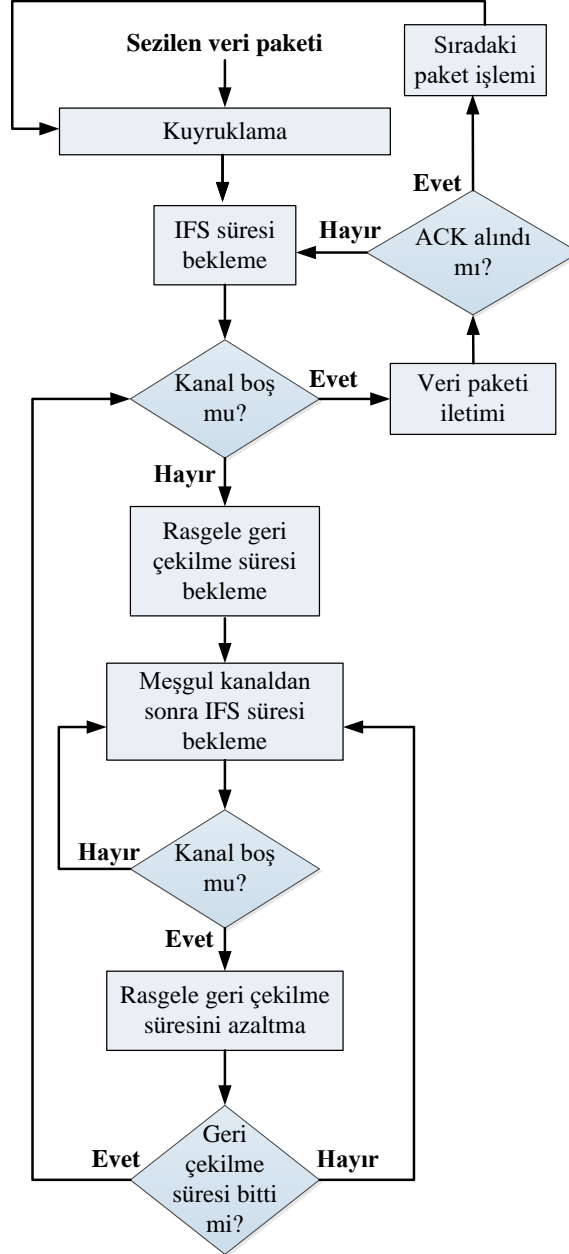


Şekil 1. Kablosuz Algılayıcı Ağ Ortamı.

Tablo 1’de, algılayıcı ağ ortamının benzetim parametreleri ve değerleri verilmektedir.

Tablo 1. Benzetim Parametreleri.

Parametre	Değer
Modülasyon tekniği	BPSK
Veri oranı	1 Mbps
Algılayıcı düğüm sayısı	12
İletim gücü	20 mw
Paketi boyutu	58 Byte
Sezme süresi	0,128 ms
Frekans	3,5 Ghz



Şekil. 2. Önerilen Yaklaşımın Akış Diyagramı.

Şekil 2’de, önerilen algılayıcı düğüm için veri iletiminin akış diyagramı gösterilmektedir. İlk olarak, sezilen veri paketleri kuyruğa eklenmektedir. Rasgele IFS (çerçeveler arası bekleme süresi) beklenmektedir. Kanalın durumu boş ise, veri paketi iletilmektedir. ACK (bildirim) paketi alınır ise, bir sonraki veri paketinin işlem süreci başlatılmaktadır. Eğer belirli bir süre içinde ACK alınmazsa, veri paketini yeniden iletmek amacıyla IFS süresi beklenmektedir. Kanalın durumu boşta değil ise, rasgele geri çekilme süresi beklenmektedir.

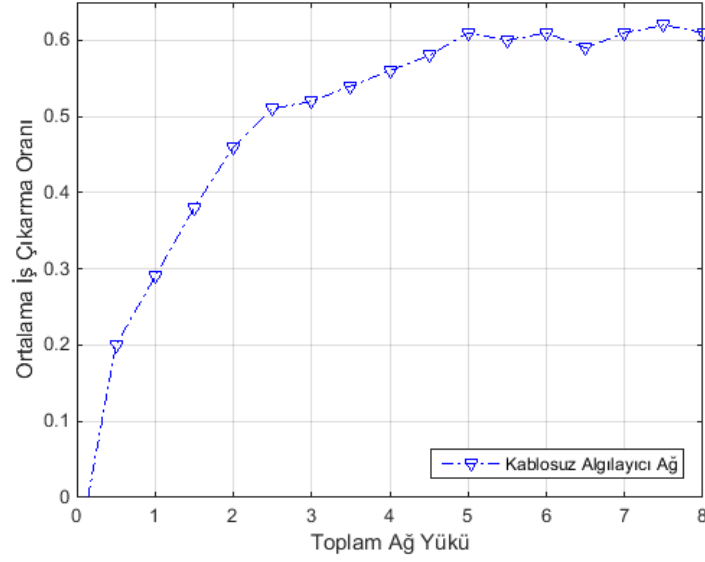
Meşgul kanaldan sonra rasgele IFS süresi beklenmektedir. Kanal boşta ise, rasgele geri çekilme süresi azaltılmaktadır. Aksi takdirde, meşgul kanaldan sonra rasgele IFS beklenmektedir. Geri çekilme süresi azaltıldıktan sonra, geri çekilme süresinin bitip bitmediği kontrol edilmektedir. Geri çekilme süresi bitmedi ise, meşgul kanaldan sonra rasgele IFS beklenmektedir. Geri çekilme süresi bitti ise, kanalın boş olduğundan emin olmak için tekrar kontrol edilmektedir.

Riverbed Modeler benzetim yazılımı; benzetim, tasarım ve veri toplama gibi çok sayıda araçtan oluşmaktadır. Ek olarak Riverbed Modeler benzetim yazılımı, kablosuz algılayıcı ağların ve dağıtılmış ağ sistemlerinin modellenmesini sağlayan grafiksel kullanıcı ara yüzü ile kapsamlı bir geliştirme ortamı sunmaktadır. Riverbed Modeler benzetim yazılımında, bir benzetim modelinin performans değerlendirmesi, ayrıklıklar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

Kablosuz algılayıcı ağın yapılandırılması; ağ aşaması, düğüm aşaması ve işlem aşaması olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Ağ aşamasında, algılayıcı ağın topolojisi düzenlenmektedir. Düğüm aşamasında, düğümün davranışı tanımlanmakta ve çeşitli bölümleri arasında veri akışı denetlenmektedir. İşlem aşaması, durum makineleri ile karakterize edilmektedir. Durum makineleri, durumlar ve durumlar arasındaki geçişlerle birlikte kullanılmaktadır. Riverbed Modeler benzetim yazılımının kaynak kodu proto C programlama dilinde yazılmaktadır.

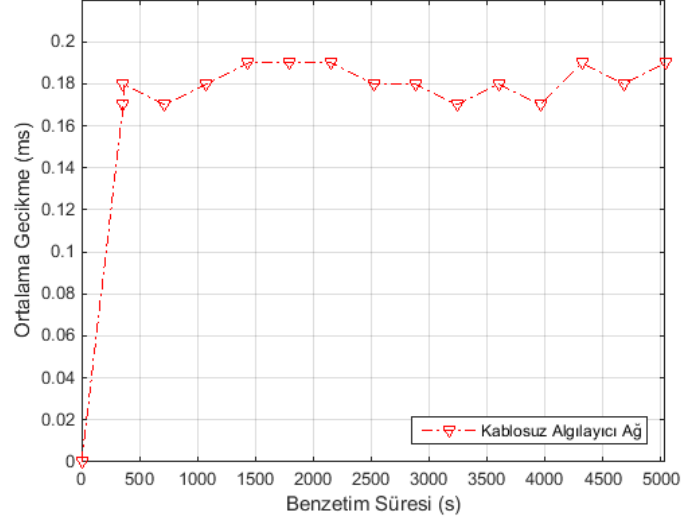
3. Bulgular

Önerilen yaklaşımın performans değerlendirmesini gerçekleştirmek için; ortalama iş çıkarma oranı, ortalama gecikme, ortalama enerji tüketimi, ortalama paket kayıp oranı ve bit hata oranı parametreleri ele alınmıştır. Benzetim modeli sonuçları her bir son uç parametresi için ayrı ayrı ele alınarak çalıştırılmıştır.



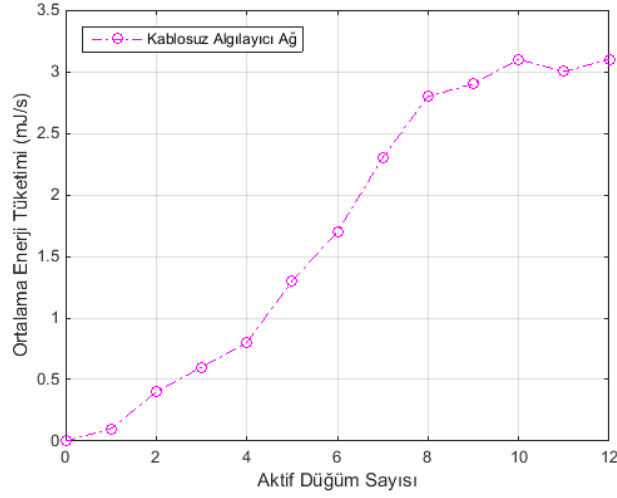
Şekil 3. İş Çıkarma Oranı Sonuçları.

Şekil 3'te, önerilen kablosuz algılayıcı ağın benzetim ve analitik modelleri için ortalama iş çıkarma oranı sonuçları görülmektedir. Toplam ağ yükü 5 olana kadar, iş çıkarma oranı artmaya devam etmektedir. 5'e ulaştığında ise, iş çıkarma oranı 0.6 seviyelerinde kalmaktadır. Bunun sebebi, toplam ağ yükü 5 olana kadar maksimum iş çıkarma seviyesine ulaşılmamaktadır. Toplam ağ yükü 5 olduğunda ise, doyum noktasına ulaşıldığından dolayı iş çıkarma oranı daha fazla artmamakta ve 0.6 civarlarında sabit kalmaktadır.



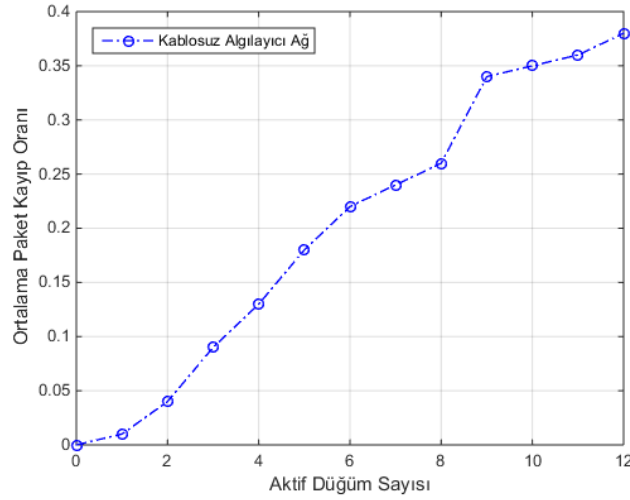
Şekil 4. Gecikme Sonuçları.

Şekil 4'te, önerilen kablosuz algılayıcı ağın benzetim ve analitik modelleri için ortalama gecikme sonuçları görülmektedir. Benzetim süresi boyunca, gecikme değeri 0.18 civarlarında seyretmektedir. Bunun sebebi, benzetim süresi boyunca toplam ağ yükünün belirli aralıklarda seyrederek çok fazla aşırı oranda artma veya azalma göstermemesidir.



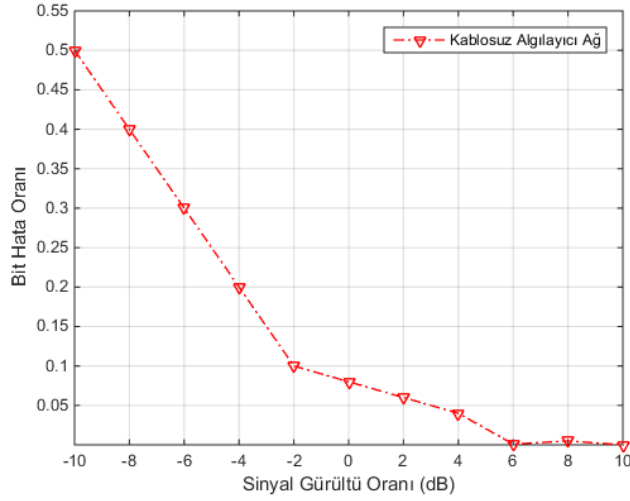
Şekil. 5. Enerji Tüketimi Sonuçları.

Şekil 5'te, önerilen kablosuz algılayıcı ağın benzetim ve analitik modelleri için ortalama enerji tüketimi sonuçları görülmektedir. Düğüm sayısının artışıyla doğru orantılı olarak, enerji tüketimi de artmaktadır. Bunun sebebi, algılayıcı ağ üzerindeki her bir algılayıcı düğümün veri sezme ve gönderme işlemleri için belirli bir seviyede enerji harcamalarıdır. Ayrıca, bir algılayıcı düğümün sezdiği veriyi gönderememesi veya hatalı göndermesi durumunda ekstra bir enerji tüketimi yapılmaktadır. Bu durum da, toplam enerji tüketiminin artmasına ve ağ ömrünün kılmasına sebep olmaktadır.



Şekil. 6. Paket Kaybı Sonuçları.

Şekil 6'da, önerilen kablosuz algılayıcı ağın benzetim ve analitik modelleri için ortalama paket kayıp oranı sonuçları görülmektedir. Benzetim süresi boyunca aktif algılayıcı düğüm sayısı arttıkça, ortalama paket kayıp oranı değeri de artmaktadır. Bunun sebebi, benzetim süresi boyunca aktif düğüm sayısının artması daha fazla olasılıkla veri kayıplarının ve dolayısıyla paket kayıplarının artması anlamına gelmektedir. Paket kayıp oranı, aktif düğüm sayısı 10 olduğunda 0.35 civarında olmakta ve algılayıcı ağlar için oldukça iyi bir sonuç vermektedir.



Şekil 7. Bit Hata Oranı Sonuçları.

Şekil 7’de, önerilen kablosuz algılayıcı ağı benzetim ve analitik modelleri için bit hata oranı sonuçları görülmektedir. Bit hata oranı sonuçları, sinyal gürültü oranı değişikliğine göre elde edilmiştir. Benzetim süresi boyunca sinyal gürültü oranı -10 değerinden +10 değerine doğru arttıkça, bit hata oranının düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi, sinyal gürültü oranının artması sinyalin daha güçlü olması anlamına gelmektedir. Sinyalin güçlü olması, gönderilen verilerin daha az hatalı bit ile iletilmesi ve hata bit oranının düşük olması demektir.

Tartışma ve Sonuç

Kablosuz algılayıcı ağlar, günümüzde çok yaygın bir şekilde kullanılan uygulama alanına sahiptir. Araştırmacılar tarafından gecikme ve enerji tüketimi ile ilgili olarak bu alanda yapılan çalışmalar halen devam etmektedir. Kablosuz algılayıcı ağlarda, enerji verimli ve gecikme duyarlı yaklaşımların geliştirilmesi oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, kablosuz algılayıcı ağlar için gecikme duyarlı CSMA ortam erişim tekniğinin başarımlı değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Kablosuz algılayıcı düğümler, sınırlı enerjiye sahip olduklarından dolayı kayıpsız veri iletişimi için CSMA ortam erişim tekniğini kullanmaktadırlar. Enerji verimliliğini artırmak amacıyla, kablosuz algılayıcı düğümler boşa iken uyku durumuna geçerek bekleme yapmaktadırlar. Analitik modelin matematiksel olarak elde edilmesinden sonra, kablosuz algılayıcı ağ yapısının benzetim modeli Riverbed yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Kablosuz algılayıcı ağı performansını analiz etmek için; gecikme, enerji ve iş çıkarma oranı parametreleri incelenmiştir. Performans değerlendirmesi sonuçları incelendiğinde, CSMA tekniği sayesinde ortalama gecikmenin önemli derecede düşürüldüğü görülmektedir. Ayrıca, enerji tüketimi makul düzeyde tutularak kablosuz algılayıcı düğümler sayesinde maksimum iş çıkarma oranı elde edilmektedir.

Gelecek çalışmalarda, gecikme duyarlı ve enerji verimli kablosuz algılayıcı ağ tasarımlarının farklı sualtı veya yeraltı uygulama alanlarına özgü olacak şekilde yapılması planlanmaktadır.

Referanslar

- Achir, M. & Ouvry, L. (2005). QoS and energy consumption in wireless sensor networks using CSMA/CA. *Systems Communications*, 14-17 Ağustos, Montreal, 33-39.
- Agbota, H. (2010). Why collisions happen: A pathology of CSMA for wireless sensor networks in high contention. *Seventh International Conference on Networked Sensing Systems*, 15-18 Haziran, Kassel, 281-285.
- Al-Mamun, M., Karmakar, G.C. & Kamruzzaman, J. (2010). A contender-aware backoff algorithm for CSMA based MAC protocol for Wireless Sensor Network. *16th Asia-Pacific Conference on Communications*, 31 Ekim-3 Kasım, Auckland, 261-266.
- Bertocco, M., Gamba, G., Sona, A. & Vitturi, S. (2007). Performance Measurements of CSMA/CA-Based Wireless Sensor Networks for Industrial Applications. *IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference*, 1-3 Mayıs, Warsaw, 1-6.
- Collotta, M., Cascio, A.L., Pau, G. & Scatá, G. (2013). A fuzzy controller to improve CSMA/CA performance in IEEE 802.15.4 industrial wireless sensor networks. *IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, 10-13 Eylül, Cagliari, 1-4.
- Dahham, Z., Sali, A., Ali, B.M. & Jahan, M.S. (2012). An efficient CSMA-CA algorithm for IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks. *International Symposium on Telecommunication Technologies*, 26-28 Kasım, Kuala Lumpur, 118-123.

- Haghighi, S., M., Mohamedpour, K., Varadharajan, V. & Quinn, B.G. (2011). Stochastic Modeling of Hello Flooding in Slotted CSMA/CA Wireless Sensor Networks, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 6, 1185-1199. doi: 10.1109/TIFS.2011.216336
- Lenka, M.R., Swain, A.R. & Sahoo, M.N. (2016). Distributed Slot Scheduling Algorithm for Hybrid CSMA/TDMA MAC in Wireless Sensor Networks. *IEEE International Conference on Networking, Architecture and Storage*, 8-10 Ağustos, Long Beach, 1-4.
- Mahlknecht, S. & Bock, M. (2004). CSMA-MPS: a minimum preamble sampling MAC protocol for low power wireless sensor networks. *IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, 22-24 Eylül, Vienna, 73-80.
- Shrestha, B., Hossain, E. & Camorlinga, S. (2013). Hidden node collision mitigated CSMA/CA-based multihop wireless sensor networks. *IEEE International Conference on Communications*, 9-13 Haziran, Budapest, 1570-1575.
- Shu, T., Salameh, H.A.B. & Krunz, M. (2006). WSN11-5: Cross-layer Optimization of a CSMA Protocol with Adaptive Modulation for Improved Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks. *IEEE Globecom*, 27 Kasım-1 Aralık, San Francisco, 1-5.
- Shukla, P.K., Silakari, S. & Bhadoriya, S.S. (2009). Network Security Scheme for Wireless Sensor Networks using Efficient CSMA MAC Layer Protocol. *Sixth International Conference on Information Technology: New Generations*, 27-29 Nisan, Las Vegas, 1579-1580.
- Ur Rehman, M., Driberg, M. & Badruddin, N. (2014). Probabilistic polling MAC protocol with unslotted CSMA for wireless sensor networks (WSNs). *5th International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, 3-5 Haziran, Kuala Lumpur, 1-5.
- Waghole, D.S. & Deshpande, V.S. (2014). Analyzing the QoS using CSMA and TDMA protocols for wireless sensor networks. *International Conference for Convergence for Technology*, 6-8 Nisan, Pune, 1-5.
- Youn, M., Oh, Y., Lee, J. & Kim, Y. (2007). IEEE 802.15.4 Based QoS Support Slotted CSMA/CA MAC for Wireless Sensor Networks. *International Conference on Sensor Technologies and Applications*, 14-20 Ekim, Valencia, 113-117.
- Zhao, J., Sun, X., Li, Z., Hou, H. & Sun, P. (2010). A novel data collision rate-aware energy model design with single-channel CSMA/CA MAC in Wireless Sensor Networks. *2nd International Conference on Computer Engineering and Technology*, 16-18 Nisan, Chengdu, 483-486.



Endüstri Mühendisliği Eğitimi ve Endüstri 4.0 İlişkisinin ESOĞU Endüstri Mühendisliği Öğrencileri Bakışıyla Analizi

Analysis of Industrial Engineering Education and Industry 4.0 Relationship with ESOĞU Industrial Engineering Students' Perspective

Esra Sertel¹ , Yeliz Buruk Şahin² , A. Attila İşlier² 

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Sivrihisar Meslek Yüksek Okulu, 26600 Eskişehir, TÜRKİYE

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 26480 Eskişehir, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 16/09/2019

Kabul / Accepted: 17/12/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Yeni teknolojilerle şekillenen, sürekli değişim ve gelişim gösteren endüstriyel ortam sebebiyle, işgücüne katılmak üzere olan öğrenciler, endüstrinin ihtiyaç ve beklentilerini karşılamalıdır. Bu durum, öğrencilerin kendilerini geliştirmeleri ve aldıkları akademik eğitimin de yeni teknolojilerle uyumluluğu ile sağlanabilir. Bu bağlamda, endüstri mühendisliği öğrencilerinin Endüstri 4.0 başlığı altında konumlanmış yeni teknolojilere olan ilgilerinin ve bilgi düzeylerinin tespiti, öğrencilerin kendilerini hangi konularda yetkin ya da yetersiz hissettiklerinin araştırılması önemlidir. Bu çalışmanın amacı, endüstri mühendisliği öğrencilerinin Endüstri 4.0 farkındalıklarının araştırılmasıdır. Çalışmada kullanılan veriler, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği'nde 2018 Bahar döneminde eğitimine devam eden öğrencilere anket çalışması uygulanarak elde edilmiştir. Bu doğrultuda, 118 katılımcıdan elde edilen anket verileri kullanılarak SPSS programı aracılığıyla yapılan istatistiksel analizler yorumlanmıştır. Sonuçlar, öğrencilerin Endüstri 4.0'a bakış açısını ortaya koymuş ve mühendislik eğitimi ile ilgili öncelikli hususları ve öğrencilerin beklentilerini açığa çıkarmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Endüstri 4.0, Mühendislik Eğitimi, Anket Çalışması, Öğrenci Görüşleri”

Abstract

Due to the constantly changing and evolving industrial environment shaped by new technologies, students who are about to join the labor force must meet the needs and expectations of the industry. This can be ensured by the students' self-improvement and the compatibility of their academic education with the new technologies. In this context, to determine the level of knowledge and interest of industrial engineering students on new technologies related to Industry 4.0, and to investigate on which subjects they feel themselves competent or inadequate is getting more and more important. The aim of this study is to investigate the Industrial 4.0 awareness of industrial engineering students. The data used in the study were obtained from the questionnaire applied to the students who were studying in the Industrial Engineering Department of Eskişehir Osmangazi University in the spring term of 2018. The results revealed the students' view of Industry 4.0 and highlighted the priorities and expectations of students about engineering education.

Key Words

“Industry 4.0, Engineering Education, Questionnaire Survey, Student Opinions”

1. Giriş

Geçmişte imalat sektörü, endüstriyel devrimlerden ciddi şekilde etkilenmiştir. Günümüzde ise bu etkilenme yaşamın tüm alanlarını kapsamaktadır. Söz konusu devrimler, üretim süreçleri yanında işgücü pazarı ile eğitim sistemlerinin de dönüştürülmesini gerektirmektedir. Bu süreçte bazı yeni meslekler ortaya çıkarken, bazılarının da kaybolduğu görülmektedir.

Endüstri 4.0 çerçevesinde en önemli varlığın insan faktörü olduğu söylenebilir. Gerçekten de dijital dönüşüm sürecinde insan önemli bir bileşendir. Pek çok kişi dijital çözümleri ve robot teknolojilerini işini kaybettirecek bir tehlike olarak görmektedir. Ancak, teknolojinin işleri kolaylaştırma avantajı göz ardı edilemez. Ayrıca, robotlaşma ve otomasyon nedeniyle âtıl kalacak işgücü için başka fırsatlar ortaya çıkacağı da açıktır (Nagy vd., 2018). Endüstriyel teknolojilerdeki gelişmeler doğrultusunda, genç neslin teknik ve mühendislik konularındaki eğitiminde mevcut sistem ve yöntemlerin yeterliliklerinin yeniden değerlendirilmesi gerekliliği doğmuştur (Richert vd., 2016; Benešová ve Tupa, 2017). Günümüz öğrencileri globalleşen dünyada, gün geçtikçe otomatikleşen fabrikalarda daha esnek çalışma koşulları ile karşılaşarak, kendilerine bu alanda yer bulmaya çaba göstereceklerdir. Bu yönüyle, uyum sürecine katkı sağlayacak yeni beceri ve yeteneklere sahip olmak oldukça önemlidir. Yüksek teknolojiyi yönetmekte sadece yüksek beceri ile donatılmış personelin başarılı olabileceği açıktır. Sanayi Üniversite iş birlikleri de özellikle bu noktada önem taşımaktadır (Baygin vd., 2016).

Endüstri 4.0 alanındaki çalışmalar iş yaşamının çeşitli alanlarına etkisi olduğu düşünülen birçok bileşeni ve teknolojiyi ele almaktadır. Endüstri 4.0 teknolojilerine uyum sağlamak yoluyla üreticiler yeni pazarlar edinebilecek, büyüyen ekonomi ile birlikte ihtiyaçlarını karşılayabilecek, pazara yeni ürün ve hizmetler sunabilecektir. Endüstri 4.0'ın getirdiği değişimin –diğer meslek dalları yanında- Endüstri mühendislerinin bilgi ve yetenek gereksinimlerini de değiştirme potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Endüstri mühendisliği eğitimi ve müfredatının da bu doğrultuda değiştirilmesi ve bu yeni sanayi devrimi aşamasına uyum sağlaması beklenmektedir.

Literatürde mühendislik ve özellikle endüstri mühendisliği eğitimine yönelik değerlendirmelerde bulunan çalışmalar ele aldıkları konular ve kullanılan yaklaşımlar boyutunda incelenmiş ve sonuçlar Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Literatür araştırması

Yazar	Yıl	Ele Alınan Konu	Kullanılan Yöntem/Yaklaşım
Chen vd.	2005	Endüstri mühendisliği müfredat içeriğinin yaratıcılığı destekleme bakış açısıyla değerlendirilmesi	Torrance yaratıcı düşünme testi
Acar	2007	Üniversite öğrencilerinin eğitim kalitesine bakışının incelenmesi	AHPve Servqual
Erden	2008	Fiziksel ürün tasarım dersi değerlendirmesi	Ders içeriği/ proje uygulama tanıtımı
Loyalka vd.	2014	Brezilya, Rusya, Hindistan ve Çin’deki mühendislik eğitiminin kalitesinin araştırılması	Geçmiş dönem verilerinin analizi, anket çalışması
Erginel vd.	2016	Türkiye’de çalışan endüstri mühendislerinin mevcut durumunun ve mesleğin geleceğinin değerlendirilmesi	Anket çalışması
Braghirolli vd.	2016	Endüstri mühendisliği birinci sınıf öğrencileri için eğitimsel oyunların başarısının değerlendirilmesi	Eğitimsel oyun, anket çalışması
Uçar ve İşleyen	2019	Endüstri mühendisliği eğitimi veren üniversitelerin değerlendirilmesi	Anket çalışması

Tablo 1’deki çıkarsamalar analiz edildiğinde eğitim çerçevesinde yapılmış olan çalışmaların günümüz sanayi gereksinimlerini dikkate almadan özellikle öğrenci ve mezun gruplara yapılmış analiz sonuçlarının paylaşımı olduğu ifade edilebilir. Literatürde Endüstri 4.0 ile eğitim gerekliliklerini ilişkilendiren çalışmaların ise son derece az sayıda olduğu dikkati çekmektedir. Sackey ve Bester (2016), Endüstri mühendisliği müfredatının Endüstri 4.0 boyutunda değerlendirilmesi için literatür araştırması yapmış ve bir anket çalışması uygulamıştır. Motyl vd. (2017), genç mühendislerin Endüstri 4.0’a hazır olmak için kazanmış olmaları gereken yetenek ve uzmanlıkların belirlenmesi için bir anket çalışması gerçekleştirmiş ve sonuçlarını değerlendirmiştir. Paravizo vd. (2018), Endüstri 4.0’a geçiş sürecinde oyun mekanizmalarının (gamification) nasıl kullanılabilirliğini ve eğitimde sürdürülebilirliğe etkisini araştırmıştır.

Bu çalışmada ise, diğer çalışmalardan farklı olarak, Endüstri 4.0 ile uyumlu olabilmek için mevcut eğitim sistemi içinde Endüstri Mühendisliği bölümü öğrencilerinin Endüstri 4.0 konusundaki farkındalıklarının belirlenmesi ve böylece yapılabilir tespitler çerçevesinde eğitim boyutunda yenilikler ortaya koyacak görüşlerin ortaya çıkarılması hedeflenmiştir. Araştırma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği öğrencileri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bilindiği kadarıyla, yeni sanayi devrimi Endüstri 4.0 ile gelen ihtiyaçları tespit ederek öğrencilerin mevcut donanımlarını ve görüşlerini analiz eden ilk çalışmadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, Endüstri devrimleri ve özellikle Endüstri 4.0 hakkında genel bilgi verilmiş, ayrıca Endüstri 4.0 ile birlikte ortaya çıkan kavramlar kısaca tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde, araştırmanın amacına ve gerçekleştirilen anket çalışmasından elde edilen verilerin analizlerine yer verilmiştir. Son bölüm olan sonuç ve önerilerde ise, bu araştırma ile elde edilen sonuçlar, bu sonuçların önemi ve katkıları ile ileriki araştırmalar için önerilere yer verilmiştir.

2. Endüstri Devrimleri ve Endüstri 4.0'da Temel Kavramlar

Bu bölümde kısaca sıralanan endüstriyel değişimler sadece sanayi ve üretimi değil toplumların demografik özelliklerini, kültürlerini ve ekonomileri derinden etkilemiştir. Endüstri Devrimi öncesi ekonomik faaliyetler temelde tarım ve hayvancılığa dayalı iken, Endüstri Devrimi ile birlikte makineleşme doğmuş ve kitle üretimi ortaya çıkmıştır (Stearns, 2018).

Endüstri 1.0: ilk etkilerini İngiltere'de 1760 ve 1830 arasında dokuma tezgâhları ile göstermeye başlamıştır (Mokyr, 2018). Makineleşme ile odun yerine taş kömürü ve buhar kullanılmaya başlanmıştır. Eski usul aile şirketleri ve küçük işletmeler yerlerini daha büyük fabrikalara bırakmış, buharın, kömürün enerji kaynağı, demirin de hammadde olarak kullanımı tren yollarının gelişim sürecini hızlandırmıştır (Lasi vd., 2014).

Endüstri 2.0: teknoloji devrimi olarak da adlandırılan dönemde, üretim sistemlerinde elektriğin kullanılması ve montaj hatlarında da elektrik enerjisi kullanımı ilk önemli gelişmelerdir. Elektrikle çalışan ilk demontaj hattı, 1870'lerde ABD Cincinnati'de bir mezbahada kesim sürecinde hayata geçirilmiştir. Bundan ilham alan Henry Ford'un, otomotivde hareketli montaj bantlarını kullanmaya başlanması endüstrileşme ve seri üretime geçiş sürecinde önemli gelişmelerdir (Özüdoğru vd., 2018). Hayat koşulları hızla değişirken, sosyal ve ekonomik olarak önemli merkezler kurulmuş, kasabadan şehirlere göç hızlanmıştır. 1. Endüstri Devrimi etkilerini İngiltere ve Avrupa çapında göstermiş iken, 2. Endüstri devrimi ABD ve Japonya gibi birçok bölgeyi etkileyerek tüm dünyaya yayılmıştır.

Endüstri 3.0: üretimde otomasyon olarak tanımlanmaktadır. Bu süreçte, bilgisayar, fiber optik, nükleer, biyotarım, lazer ve biyogenetik gibi bilimsel gelişmeler üretim yöntemlerini etkilemiştir. Ticaret ve endüstri, iletişim ve ulaştırma imkânları sayesinde küreselleşmiştir. Bu süreçteki, en önemli gelişmeler dünya kaynaklarının hızla tükenmesi ve sürdürülebilirlik kavramının öne çıkması olmuştur. Ürünlere olan talep üç boyutta önem kazanmıştır: Hacim, çeşitlilik ve teslim süresi (Yin vd. 2018).

Endüstri 4.0: ilk kez 2011'de Almanya Hannover Fuarı'nda tanıtılan Endüstri 4.0, insan gücü olmadan çalışan makinelere ve üretim sistemlerine odaklanmaktadır. Benzer teknolojiler Amerika'da "Endüstriyel İnternet" ve Çin'de "İnternet +" olarak isimlendirilmiştir (Wang vd., 2016b)

Akıllı teknolojilerin yönlendirdiği bu devrim, nesnelerin ve hizmetlerin interneti gibi kavramları beraberinde getirmiştir (Gu vd., 2019). Üretimin gelecekte, daha verimli üretim sistemleri içermesi ve ürünlerin kendi üretim süreçlerini kontrol etmesi beklenmektedir (Lasi vd., 2014). Endüstri 4.0'dan beklenen başlıca katkılar; üretim birimlerinin karşılıklı iletişimi, gerçek zamanlı ulaşılabilir veriler ve yüksek katma değerdir. Her dönemde olduğu gibi, 4. Sanayi devrimi de ihtiyaçlar sonucu ortaya çıkmıştır. Almanya öncülüğünde başlayan süreçte temel hedef, işgücüne olan ihtiyacı azaltarak rekabet avantajı sağlamak ve maliyetleri düşürmek olmuştur.

Genç nesli en çok etkileyecek kavramlar yeni sanayi devrimi Endüstri 4.0 ile birlikte gelmektedir. Endüstri 4.0 ile birlikte ortaya çıkan ve uygulanabilirliğini destekleyen temel kavram ve araçlar hakkında kısaca şu şekilde sıralanabilir:

- **Nesnelerin İnterneti:**

İlk olarak, 1990'da Kevin Ashton tarafından tanıtılmış, ancak Endüstri 4.0 ile hayata geçirilmiştir. Nesnelerin İnterneti'nin, kendi kendini yönetebilen akıllı teknolojiler sayesinde internete tam teşekküllü erişimi sağlayarak, Endüstri 4.0'ın başlamasına ön ayak olduğu söylenebilir. İçerisinde ağ bağlantısı bulunan fiziksel cihazların iletişimini ve uzaktan kumanda faaliyetlerini içermektedir. Günümüzde, uygulama alanları "giyilebilir teknoloji", "akıllı evler ve şehirler", "sağlık sektörü" ve "imalat" sektörüdür. Gelecekteki potansiyel alanlarının ise, "trafik kontrolü", "enerjide eniyileme", "akıllı hasta ve ilaç takibi" gibi sektörler olacağı söylenebilir. Nesnelerin interneti teknolojisinin akıllı şehirler, imalat ve sağlık konularında farklı sektör ve şirket uygulama örnekleri Zhong vd. (2017)'de belirtilmiştir.

- **Akıllı ve İşbirlikçi Robotlar:**

Endüstri 4.0 akıllı robotlardan faydalanır. Akıllı robotlar üç temel bileşenden oluşur. Bu bileşenler; çevre kontrolü yapan "duyucular", değişiklikleri algılayan "işlemciler" ile yapay zekâ ve nasıl tepki verileceğine karar veren "dengeleyiciler"dir. Robotların anatomisinde temel bakış açısı, "dış kontrol olmadan en uzun çalışmayı" sağlamaktır. Otonom robotlar, üretim yöntemlerinin daha hassas olduğu durumlarda ve insanın çalışmasının kısıtlı olduğu alanlarda daha çok kullanılır. Verilen görevleri, hassas, zamanında ve güvenli şekilde yerine getirebilirler (Bahrin vd., 2016; Vaidya vd., 2018). Yeni nesil düşük maliyetli robotlar ile otomasyon hızlanacaktır. Arttırılmış duyu ve yazılım yetenekleri yanında yeni imalat donanımının daha akıllı ve fabrikaya uyumlu olacağı beklenmektedir (Kusiak, 2018).

- **Siber-Fiziksel Sistem**

Fiziksel üretimi izlemek ve etkinleştirmek için fiziksel süreçlerinin dinamiklerini yazılımla birleştiren bir kavramdır. Siber fiziksel sistem, karşılıklı olarak birbiriyle etkileşimli sistemlerin fiziksel varlıklarını ve hesaplama yeteneklerini yönetmek için dönüştürücü teknolojiler olarak tanımlanır (Lee vd., 2015). Fiziksel makineleri siber teknoloji ile bütünleştirerek daha

akıllı hale getirmeyi hedefler. Diğer ifadeyle, makineleri ekstra zeki ve esnek yazılımlar sayesinde kontrol eden sistemlerdir (Stock vd., 2018).

- **Katmanlı Üretim**

Şekillendirmede malzeme eksiltmeye yönelik geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak, malzemeleri katmanlar halinde ekleyip son şeklini vermeye yönelik bir üretim işlemidir. Geleneksel imalata prototip hazırlama süreci hem maliyetli hem de zaman alıcı iken, katmanlı üretimde kullanılan 3D yazıcılar prototip oluşturma, düşük maliyetli üretim fırsatı ve yaratıcılık ile yeni fikirlerin oluşmasını sağlar. Katmanlı üretimin diğer yararları Tofail vd. (2018)'de özetlenmiştir.

- **Bulut Bilişim**

İnternet tabanlı bir bilgi işlem yaklaşımıdır. Birçok iş, birbirine bağlı bilgisayarlar tarafından geniş bir ağa paylaşılır. General Electric, Siemens, HP ve Facebook gibi şirketler bulut bilişimi kullanmaktadır. Bulut bilişim; veri depolama gibi sorunları uzaktan çözer. Örneğin büyük veri kümelerini depolamak maliyet ve kapasite gerektirir. Atlantic, Amazon, Google ve Microsoft gibi bulut sistem sağlayıcılar bilgiyi işleyebilen analitik araçlar dağıtır ve sunar (Gilchrist, 2016).

- **Sanal Gerçeklik Teknolojisi**

Bu teknoloji, bilgisayar tarafından üretilmiş ses ve şekillerle zenginleştirilmiş, canlı ve gerçek dünya içerikleri ve çevreyi inceleyen GPS tabanlı doğrudan ya da dolaylı bir fiziksel görünümüdür. Sanal öğelerin bütünlük bir gerçeklik yaratarak fiziksel alana katılmasını sağlar. Bu teknolojiye, General Electric'in Brezilya'daki araştırma tesisinde; -çalışanların açık deniz petrol ve gaz platformları inşa etmesi ve bakımını yapması için yapılmakta olan- artırılmış gerçeklik deneyleri örnek olarak gösterilebilir (Özüdoğru vd., 2018).

- **Büyük Veri**

Bugün; bilgisayar araçları ile büyük miktarda bilgi üretilebilir, toplanabilir ve işlenebilir. Analiz edebileceğimiz bir büyük veri var. Yeni bir kavram olan 'büyük veri'; -tipik veritabanı yazılımları aracılığı ile sağlanamayan- veri toplama, saklama, yönetme ve analiz etme teknolojisidir (Banger, 2017).

- **Akıllı Fabrikalar**

Endüstri 4.0'ın önemli bir özelliği olan akıllı fabrika, akıllı üretim için ağlarla yapılandırılmış imalat sistemi ve dikey bütünlüşmeyi vurgular. Büyük veriye dayalı geribildirim ve eşgüdüm ile yönlendirilen ve kendi kendini düzenleyen çok ajanlı bir sistem yapısındadır. Nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim ve yapay zekâ teknolojileri akıllı fabrika uygulamalarına yardımcıdır (Wang vd., 2016a).

3. Materyal ve Yöntem

Bu araştırma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğrencilerinin Endüstri 4.0 kavramına ilişkin görüşlerini tespit ederek, bu konuya yönelik genel yaklaşımlarını ve farkındalıklarını değerlendiren ve var olan durumu ortaya koymayı amaçlayan bir çalışma olup, katılımcılara uygulanan bir anketten derlenen verilere dayanmaktadır.

3.1. Araştırmanın Önemi ve Amacı

Geleceğin endüstri vizyonu olarak adlandırılacak Endüstri 4.0, önümüzdeki yıllarda üretim ve hizmet sektöründe köklü değişikliklere yol açacaktır. Bu süreçte daha fazla nitelikli elemana ihtiyaç duyulacağı açıktır. Üreticiler, tedarikçiler ve teknoloji şirketlerinin ihtiyacı olan nitelikli ve alanında uzman elemanların da üniversiteler tarafından sağlanması beklenmektedir. Bu bağlamda, Endüstri 4.0'ın gerektirdiği niteliklerle donatılması gereken üniversite öğrencilerinin, değişmekte olan çalışma hayatında kendilerine yetkinlik kazandıracak eğitime ve sanayi devriminin geldiği son noktaya ilişkin görüşleri önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi (ESOGÜ) Endüstri Mühendisliği öğrencilerinin Endüstri 4.0'a bakış açısının ve bu konudaki farkındalık seviyelerinin anlaşılması, endüstri mühendisliği eğitiminde geleneksel yaklaşımdan çağın gerektirdiği müfredata geçişin öğrenciler arasında nasıl karşılanacağını belirlemesidir. Bunu sağlayabilmek için de, öncelikle katılımcı öğrencilerin Endüstri 4.0 kavramına ilişkin görüşlerini ortaya koyarak, farkındalıkların tespit edilmesi hedeflenmiştir.

3.2. Anket Tasarımı ve Veri Analizi

Endüstri Mühendisliği öğrencilerinin Endüstri 4.0 kavramına ilişkin görüşlerini tespit etmek için yapılan araştırmada, örnek olay modeli kullanılmış, veri toplamak için “Endüstri 4.0 Öğrenci Farkındalık Anketi” uygulanmıştır.

Araştırmanın ana kütesini, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği öğrencileri oluşturmaktadır. Söz konusu ana kütle birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü sınıflarda okumakta olanlar ile yüksek lisans ve doktora öğrencilerini kapsamaktadır. 2017-2018 bahar döneminde lisans düzeyinde birinci öğretimde 498, ikinci öğretimde 432 olmak üzere 932 öğrenci; lisansüstü düzeyde ise 151 yüksek lisans, 29 doktora düzeyinde olmak üzere 180 öğrenci mevcuttur. Toplam 1112 öğrenci için %10 hata payıyla, %95 güven düzeyinde 89 katılımcının yeterli olacağı hesaplanmış, 118 öğrencinin katılımı ile araştırma gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, öğrencilerin Endüstri 4.0’a bakış açılarını tespit etmek için, veri toplama yöntemi olarak -ilgili literatürden de yararlanıp- bir anket geliştirilmiştir. Bilgi derleme formu şeklindeki çevrimiçi anket, ESOĞÜ Ders Yönetim Sistemi (DYS) üzerinden kayıtlı olan bütün öğrencilere gönderilmiş ve arzu eden öğrencilerin katılımı sağlanmıştır. Anket, 1-30 Mayıs 2018 tarihleri arasında açık kalmış ve katılım çağrısına 118 öğrenci tarafından olumlu geribildirim yapılmıştır.

Anket formu üç bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde katılımcı hakkındaki yaş, cinsiyet, sınıf, staj ve iş tecrübesi gibi bilgileri içeren demografik sorular, ikinci bölümde ise lisans eğitimine yönelik sorular sorulmuştur. Bu bölümün başında; endüstri mühendisliği yazılımlarına, kodlama bilgisine, modelleme, benzetim teknikleri kullanımı sorgulanırken ortak/seçmeli ders alınmasında fayda görülen diğer bölümler hakkındaki görüşlerine yönelik sorulara da yer verilmiştir. Üçüncü bölümde öğrencilerin Endüstri 4.0 ile ilgili konulardaki bilgi düzeylerini tespit etmek adına sorulan sorular yer almıştır. Endüstri 4.0 ile ilgili projelerde görev alma, Endüstri 4.0 platformlarına üye olma durumları ve Endüstri 4.0 uygulamalarının yaygınlaşmasıyla toplumda ve üretim sektöründe oluşacak değişimler hakkındaki görüşlerine yönelik sorular yer almıştır.

Ankette yer alan maddeler, “1: Kesinlikle Katılmıyorum, 2: Katılmıyorum, 3: Kararsızım 4: Katılıyorum, 5: Kesinlikle Katılıyorum” olmak üzere, 5’li Likert ölçeğine göre derecelendirilmiştir. “Google Documents” ile çevrimiçi bilgi toplama formuna dönüştürülüp DYS üzerinden katılımcılara ulaştırılan anket formuyla elde edilen 118 geri dönüşten elde edilen veriler, MS Excel ve SPSS 22 paket programı ile analiz edilmiştir.

Cronbach Alpha testi, önceden belirlenmiş ölçekler doğrultusunda düzenlenmiş olan ankete verilen cevapların tutarlılığını ölçen istatistiksel bir yöntemdir. Cronbach Alpha güvenilirlik katsayısı ise, ölçek içindeki maddelerin iç tutarlılığının ve homojenliğinin bir göstergesidir. Cronbach Alpha güvenilirlik katsayısı ne kadar yüksek olursa, “ölçekte bulunan soruların birbirleriyle tutarlı ve aynı özelliğin öğelerini ortaya koydukları” yorumu yapılır. Likert tipi bir ölçekte yeterli sayılabilecek güvenilirlik katsayısı olabildiğince 1’e yakın olmalıdır. Güvenilirlik katsayısının 0,8’den büyük olması yüksek güvenilirliğe sahip olduğunu göstermek için yeterlidir (Uçar ve İşleyen, 2019). SPSS 22 ile yapılan analiz sonucunda Cronbach Alpha değeri 0,937 olarak bulunmuştur. Bu durumda, ölçekte bulunan soruların tutarlı olduklarını ve aynı özelliğin öğelerini ortaya koyduklarını söylemekte sakınca yoktur.

4. Bulgular ve Tartışma

Çevrimiçi yaklaşımla uygulanan ankete dair çözümlenmeler yapılırken, öncelikle çeşitli sorulara ilişkin yanıtların dağılımları grafiksel olarak incelenmiştir. Cinsiyet, sınıf, staj ve iş durumu gibi tanımlayıcı bilgiler sunulmuştur. Korelasyon analizi ve tek yönlü varyans analizi gibi uygun istatistiksel yöntemler kullanılmıştır.

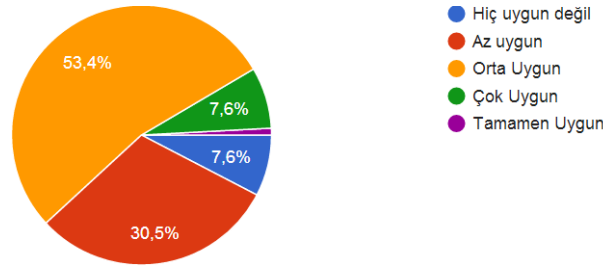
4.1 Grafiksel Analiz

Anketin ilk bölümündeki sorulara verilen yanıtlarla katılımcılar hakkında birtakım tanımlayıcı bilgiler elde edilmiştir. Bu bilgiler Tablo 2’de yer almaktadır. Araştırmaya katılanların 75’i kadın (%64) ve 43’ü erkektir (%36). Katılımcıların kayıtlı oldukları sınıflar incelendiğinde 52 kişi birinci sınıf (%44), 26 kişi ikinci sınıf (%22), 22 kişi üçüncü sınıf (%19), 10 kişi dördüncü sınıf (%8), 8 kişi ise (%7) YL/DR öğrencisidir. Staj, iş tecrübesi ve çalışılan sektörlerle ilişkin veriler Tablo 2’de görüldüğü gibidir.

Tablo 2. Tanımlayıcı Bilgiler

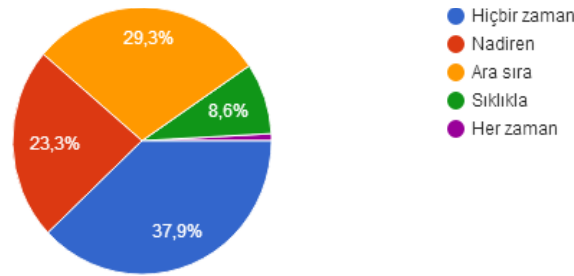
Tanımlayıcı Bilgiler	Frekans	Oran (%)	Tanımlayıcı Bilgiler	Frekans	Oran (%)
<u>Cinsiyet</u>			<u>Anket sırasında çalışıyor olma durumu</u>		
Kadın	75	63,6	Yarı zamanlı	12	10,2
Erkek	43	36,4	Tam zamanlı	8	6,8
<u>Sınıf</u>			Çalışmıyor	98	83,1
1	52	44,1	<u>İş deneyimi bulunan sektörler</u>		
2	26	22,0	Gıda	7	17,5
3	22	18,6	Otomotiv	7	17,5
4	10	8,5	Kamu/eğitim/askeri personel	6	15
YL/DR	8	6,8	Bankacılık	3	7,5
<u>Staj</u>			Bilgi işlem	4	10
Evet	39	33,1	Kimya/tekstil/endüstriyel ürünler	7	17,5
Hayır	79	66,9	Lojistik	1	2,5
			Diğer	5	12,5

Anketin ikinci bölümü, lisans eğitimine yönelik soruları içermektedir. Öğrenim görmekte oldukları bölüme ilişkin, Endüstri Mühendisliği mevcut ders müfredatının sanayinin ihtiyaçlarına uygunluğu konusundaki görüşleriyle ilgili soruya verilen cevaplar değerlendirildiğinde, öğrencilerin büyük bir kısmı (%53,4) Şekil 1’de görüldüğü gibi müfredatın ‘orta derecede uygun’ olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 1. Endüstri mühendisliği mevcut ders müfredatının sanayi ihtiyaçlarına uygunluk durumu

Modelleme ve benzetim teknolojilerini kullanma sıklıklarını belirtmeleri istenen katılımcılardan %37,9’a karşı gelen 44’ü, modelleme ve benzetim teknolojilerini hiçbir zaman kullanmadığını bildirmiştir. Her zaman ya da sıklıkla kullananların oranı Şekil 2’de görülebileceği gibi sırasıyla %0,9 ve %8,6 olmak üzere oldukça düşüktür.



Şekil 2. Modelleme ve benzetim teknolojilerini kullanma sıklığı

Endüstri mühendisliği eğitimine ilişkin yöneltilen “kullandığınız yazılımlar” sorusuna ilişkin gelen yanıtlar analiz edildiğinde, katılımcıların Excel Solver, LINGO ve MatLab yazılımını daha fazla bildikleri belirlenmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Endüstri mühendisliği yazılımları bilgi düzeyi

	Hiç	Az	Orta	Çok	Tamamen
ARENA	73,8	11,0	11,0	3,4	0,8
GAMS	80,5	5,1	8,5	4,2	1,7
LINGO	60,2	20,3	11,9	5,1	2,5
MATLAB	55,1	26,3	13,6	4,2	0,8
Excel Solver	37,3	24,5	26,3	8,5	3,4
Simul8	96,6	0,86	2,54	0,0	0,0
AweSim	95,8	2,54	1,69	0,0	0,0
Simsci/Sim4me	96,6	0,85	2,54	0,0	0,0
R	95,8	0,85	3,35	0,0	0,0
WinQSB	84,7	7,6	4,2	2,5	0,8

Tablo 4’te görüldüğü üzere, katılımcıların bildikleri programlama dilleri ile ilgili soruya verilen yanıtların dağılımı incelendiğinde orta bilgi düzeyinde %44,1’lik yüksek bir oranla Visual Basic öne çıkmaktadır.

Tablo 4. Kodlama yapılabilen bilgisayar programlama dillerine ilişkin bilgi düzeyi

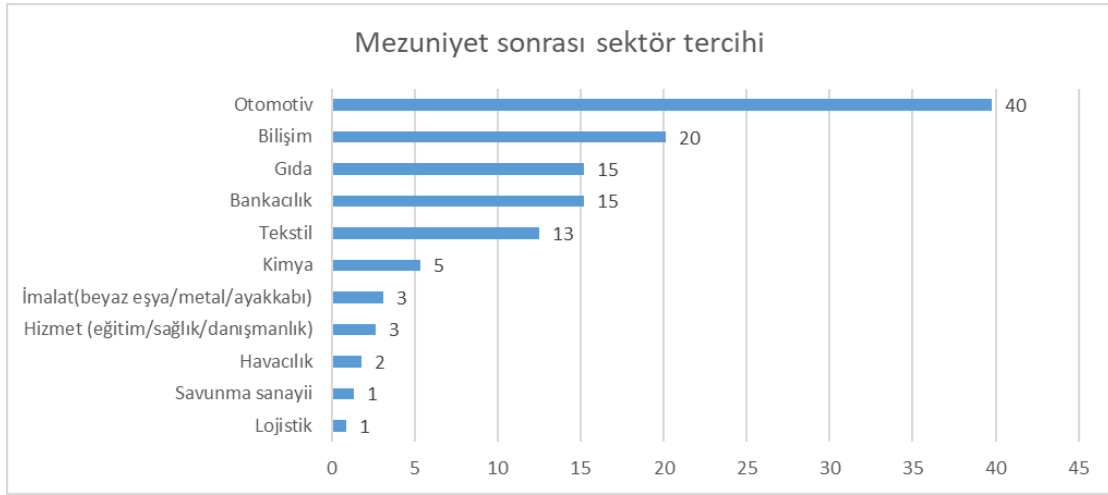
	Hiç	Az	Orta	Çok	Tamamen
FORTTRAN	95,8	1,7	1,7	0,8	0,0
C	73,7	14,4	5,9	5,1	0,8
C++	72,9	16,9	8,5	0,8	0,8
C #	74,6	13,6	10,2	0,8	0,8
MatLab	59,3	25,4	10,2	4,2	0,8
Visual Basic	11,9	28,8	44,1	12,7	2,5
PYTHON	89,0	5,1	4,2	1,7	0,0

Öğrencilerin disiplinler arası yaklaşımlara bakış açısı incelendiğinde, en çok bilgisayar mühendisliği, işletme ve endüstri ürünleri tasarımı bölümleri ile ortak ders almanın yararlı olacağını düşünmektedir (Tablo 5). Maden mühendisliği ve jeoloji mühendisliği bölümleriyle ise ortak ders almanın katkısının en az olacağı belirtilmiştir.

Tablo 5. Endüstri Mühendisliği Bölümü seçmeli ders gruplarında ortak dersler bulunmasının yararlı olacağı disiplinler

	Hiç	Az	Orta	Çok	Tamamen
Makine Mühendisliği	5,1	36,4	33,9	17,8	6,8
Bilgisayar Mühendisliği	2,5	6,8	30,5	46,6	13,6
İnşaat Mühendisliği	45,8	39,8	11,0	1,7	1,7
Kimya Mühendisliği	37,3	41,5	16,9	3,4	0,8
Elektrik Elektronik Müh.	16,9	24,6	44,9	9,3	4,2
Maden Mühendisliği	68,6	26,3	4,2	0,8	0,0
Jeoloji Mühendisliği	69,5	27,1	3,4	0,0	0,0
Metalürji Malzeme Müh.	25,4	27,1	29,7	13,6	4,2
İşletme	1,7	9,3	32,2	42,4	14,4
Mimarlık	49,2	27,1	15,3	5,1	3,4
Endüstri ürünleri tasarımı	11,0	21,2	30,5	27,1	10,2

Öğrencilerden, mezun olduklarında çalışmayı istedikleri sektörler konusunda görüş belirtmeleri istenmiştir. Buna göre en çok tercih edilen sektör Şekil 3'te görüldüğü üzere otomotiv olmuştur. Bilişim, gıda, bankacılık ve tekstil de tercih edilen sektörlerdendir.



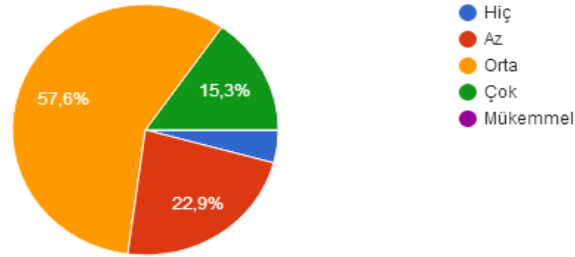
Şekil 3. Öğrencilerin mezuniyet sonrası en çok çalışmak istedikleri sektörler

Şekil 4'te ise mezuniyet sonrası çalışmak istenilen alanlara ilişkin sonuçlara yer verilmiştir. Kalite, üretim, Ar-Ge bölümlerinin öncelikli olarak tercih edildiği görülmüştür. Bir kuşak önce parlamış olan ve endüstri mühendisliği mezunlarının çok işine yarayan "kalite kontrolün" halen revaçta ve güncel olması ilgi çekicidir.



Şekil 4. Öğrencilerin mezuniyet sonrası çalışmak istedikleri alanlar

Katılımcılara sorulan “Endüstri 4.0 konusunda bilgi düzeyinizi belirtiniz” sorusuyla Endüstri 4.0 kavramı hakkındaki genel bilgi düzeyleri belirlenmek istenmiştir. Verilen yanıtların dağılımı Şekil 5’te görülmektedir. Buna göre, en büyük pay %57,6 ile orta bilgi düzeyidir.



Şekil 5. Endüstri 4.0 konusunda beyan edilen bilgi düzeyi

Daha sonra katılımcıların Endüstri 4.0 kavramının alt bileşenleri hakkındaki bilgi düzeylerini tespit edebilmek için her bileşene dair ayrı sorular sorulmuştur. Tablo 6’da, 5’li Likert ölçeğiyle verilen cevapların seviyelere göre dağılımı görülmektedir.

Tablo 6. Ayrı ayrı Endüstri 4.0 bileşenleri ile ilgili bilgi düzeyleri

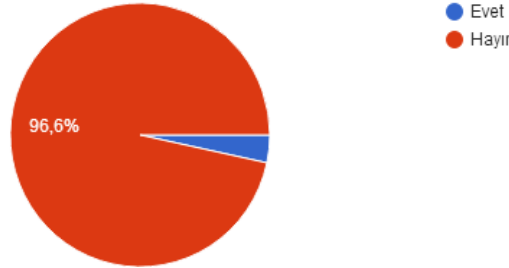
	Hiç	Az	Orta	Çok	Tamamen	Ortalama puan
Yapay Zekâ	5,1	22,0	46,6	22,9	3,4	2,97
Bilgi Teknolojisi	6,8	22,0	54,2	15,3	1,7	2,83
Büyük Veri	14,4	28,0	37,3	18,6	1,7	2,65
Bilgisayar Ağı	9,3	35,6	39,0	15,3	,8	2,63
Otomasyon	12,7	26,3	43,2	15,3	2,5	2,69
Bilgi Güvenliği	11,0	33,1	36,4	15,3	4,2	2,69
Finansal Teknoloji	22,9	34,7	32,2	7,6	2,5	2,32
Sürdürülebilirlik	16,1	28,8	37,3	16,1	1,7	2,58
Lojistik Veri Merkezi	24,6	40,7	27,1	7,6	0,0	2,18
Bulut Bilişim	12,7	27,1	37,3	18,6	4,2	2,75
Nesnelerin İnterneti	17,8	22,0	39,0	16,9	4,2	2,68

Ankette yer alan sorulardan biri de öğrencilerin lisans eğitimi süresince Endüstri 4.0 konusunda yapılan çalışmalara katılıp katılmadıklarını belirlemeye yöneliktir. Şekil 6’daki sonuçlardan görüldüğü gibi, 118 kişiden 82’si, diğer deyişle %70,7’lik büyük bir çoğunluğu bu konuda bir çalışmaya katılmadıklarını belirtmişlerdir.



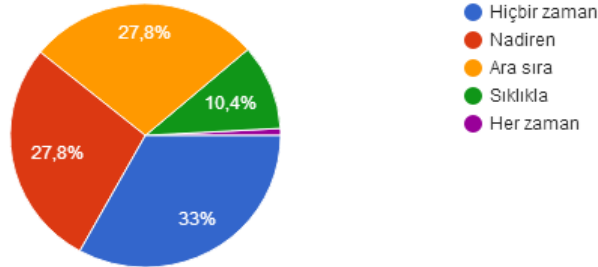
Şekil 6. Endüstri 4.0 konusunda yapılan çalışmalara katılım durumu

Şekil 7’de görüldüğü gibi katılımcılara yöneltilen “Endüstri 4.0 platformlarına (forumlar, topluluklar vb.) üye misiniz?” sorusuna ancak %3,4’lük küçük bir kısım ‘evet’ cevabı vermiştir.



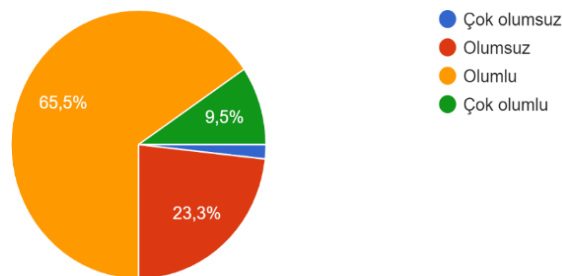
Şekil 7. Endüstri 4.0 platformlarına üye olma durumu

“Üniversite eğitiminiz sırasında Endüstri 4.0 konusunda çalışmalara katılma sıklığınızı belirtiniz” sorusuna gelen yanıtlar, Şekil 8’de görülebileceği gibi büyük bir çoğunluğun bu tür çalışmalara katılmadığını göstermektedir (118 öğrencinin sadece 13’ü bu tür çalışmalara sıklıkla ya da her zaman katıldığını söylemiştir).



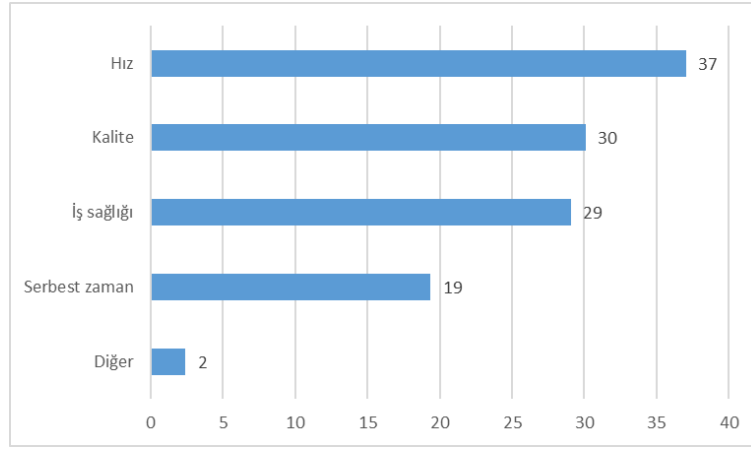
Şekil 8. Üniversite eğitiminiz sırasında Endüstri 4.0 konusunda çalışmalara katılma sıklığı

Katılımcılara sorulan, “Endüstri 4.0 uygulamalarının yaygınlaşmasının üretimi ve toplumu etkileyeceğini düşünüyor musunuz?” sorusuna, %95,7’lik oranla “evet” cevabı verilmiştir. Bu grubun büyük bir çoğunluğu, “Endüstri 4.0 uygulamalarının üretimi ve toplumu ne şekilde etkileyeceğini düşünüyorsunuz?” sorusuna ise olumlu (%65,5) veya çok olumlu (%9,5) yönde etkileyeceğini düşünmekte oldukları cevabını verirken; olumsuz ya da çok olumsuz etkiler görüleceğini düşünenlerin oranlarının toplamı Şekil 9’da görüldüğü gibi %25’e ulaşmıştır.



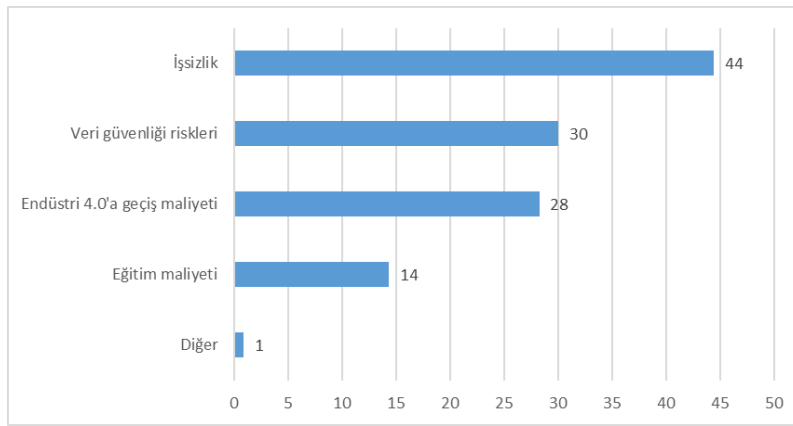
Şekil 9. Endüstri 4.0 uygulamalarının üretimi ve toplumu etkileme durumu

Olumlu etkiler gözleneceğini ifade eden katılımcıların, bunların neler olabileceği konusundaki görüşlerini belirtmeleri istenmiştir. Yanıtlarda, “hız”, “kalite”, “iş sağlığı ve güvenliği”, “serbest zaman” unsurlarına yoğunlaşırken, “diğer” başlığı altında “maliyetlerin azalması”, “üretim ve talep esnekliği”, “kişiyeye özel üretim imkânı” ve “enerji tasarrufu sağlanması” gibi faydalar vurgulanmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. Endüstri 4.0'ın olumlu etkileri

Olumsuz etkilere yönelik görüşler ise; “işsizlik”, “veri güvenliği riskleri” ile “Endüstri 4.0'a geçiş ve eğitim maliyetleri” üzerinde yoğunlaşmıştır. Endüstri 4.0'ın sadece üretimi değil ülkelerin yönetim biçimlerini bile etkileyeceği, tüm ekonomik ve sosyal politikaların yeniden planlanması gerekeceği ve işçi sınıfının kaybolmasıyla dünyanın sonunun geleceği gibi görüşler de diğer maddesinde toplanmıştır (Şekil 11).



Şekil 11. Endüstri 4.0'ın olumsuz etkileri

4.2 Açık uçlu soruların değerlendirilmesi

“Endüstri Mühendisliği mevcut ders müfredatı düşünüldüğünde, size katkısı olacağını düşündüğünüz yeni ders önerileriniz varsa belirtiniz.” sorusuna verilen sözel yanıtlar incelendiğinde en fazla talebin “yazılım”, “programlama” ve “kodlama” eğitimlerinin yoğunlaştırılması yönünde olduğu görülmüştür.

Öğrencilerin ifadelerinden bazıları şöyledir:

- Yapay Zekâ, Bulanık Mantık gibi konular ile kodlama içeren dersler olmalı,
- AutoCAD, MatLab, İleri Excel, Endüstri 4.0 dersleri verilmeli,
- Bilgisayar programlama ve yazılıma daha çok önem verilmeli,
- Kod yazma dersleri (C++ gibi),
- Sanayi işbirlikli, uygulamaya yönelik ders sayısı artırılmalı, özellikle, gerçek hayat uygulamalarının tartışıldığı dersler ilave edilmeli,
- Girişimcilik ve liderlik, Robotik, Yapay Zekâ, Benzetim, C#, C++ veya MatLab, bilgisayar destekli teknik resim (SolidWorks, AutoCAD) dersleri olmalı,
- Ürün geliştirme ve tasarım dersleri yer almalı,
- İkinci yabancı dil (Almanca, Rusça, vb.) müfredata eklenmeli,
- İletişim, yönetim ve organizasyon ile risk yönetimi gibi işletme temelli dersler yararlı olabilir,
- Liderlik eğitimi ve stres yönetimi gibi psikolojik dersler müfredata eklenmeli,
- Kendi bölümümüzde ileri yazılım ve kodlama düzeyinde ayrıntılı bir müfredat mevcut değildir. Öncelikle Phyton ve C dilleri öğretilmeli.

Anahtar kelimeler belirterek yanıtlamaları istenen “Endüstri 4.0 sizin için ne ifade ediyor?” sorusuna verilen cevaplardan dikkat çekici örnekler aşağıdaki gibidir:

- Olumlu anahtar kelimeler: “yenilik”, “hız”, “robot”, “yapay zekâ”, “insansız fabrika”, “kalite ve tam otomasyon”, “büyük veri”, “karanlık fabrika”, “siber fiziksel sistemler”, “teknoloji”, “robotlaşma”, “sanal gerçeklik teknolojisi”, “blockchain”, “bulut teknolojisi hizmetleri”, “robot çağı”.
- Olumsuz anahtar kelimeler: “işsizlik”, “korku”, “devrim”, “mavi yakanın sonu”, “kıyamet alametleri”.

“Endüstri 4.0 alanında kendinizi geliştirmek adına neler yapmayı düşünüyorsunuz?” diye sorulan katılımcıların ifade ve yorumları izleyen maddelerde belirtilmiştir:

- Endüstri 4.0 hakkında etkinliklere katılmak ve daha fazla araştırma yapmak,
- Bilgisayar programları öğrenmek,
- Bu konuda daha çok okumak,
- Bilgisayar sistemleri üzerine yoğunlaşmak ve eğitimler almak,
- Programlar ve bilişim üstüne kendimi geliştirmek,
- Yeni teknolojiler hakkında araştırmaları incelemek,
- Bazı önemli yazılım dillerini iyi derecede kullanabilmeyi öğrenmek,
- Otomasyon (özellikle Parça ve Robot Programlama) öğrenmek,
- Eğitim, panel vb. etkinliklere katılarak bilgimi artırmak,
- Endüstri 4.0’la ilgili alanlarda araştırma yapmak,
- Gelişen dünyaya daha hızlı cevap verebilmek için bu konu hakkında kendimi güncel tutmak,
- Gelecekte yok olacak ya da doğacak olan iş sektörleri, meslekler hakkında daha fazla bilgi edinip, kendim için uygun sektöre hazırlanmak.

4.3 Anket verilerinin istatistiksel analizi

Verilerin grafiksel olarak irdelenmesinin ardından, sonuçlarla ilgili yorumlar yapabilmek için bazı istatistiksel çıkarımlar yapılmıştır. Çalışmada, öğrencilerin Endüstri 4.0 konusundaki farkındalıklarının incelenmesi ve bu konudaki bilgi düzeylerinin belirlenip bu düzeyi etkileyen faktörlerin tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, Endüstri 4.0 konusundaki bilgi düzeyi ile Endüstri 4.0 proje çalışmalarına katılma durumu, derslerde bu tür içeriklere dair uygulamalarla karşılaşma sıklığı, Endüstri 4.0 platformlarına üyelik gibi değişkenler arasında ilişki olup olmadığını belirlemek için korelasyon analizi yapılmıştır. Bu değişkenler normal dağılıma uymadıkları için Spearman korelasyon katsayılarına bakılmıştır.

Şekil 12’de görüldüğü gibi, Endüstri 4.0 bilgi düzeyi ile bu konudaki projelere katılma durumu arasında ($r=0,421$ ve $p<0,01$) pozitif yönlü anlamlı orta şiddette bir ilişki bulunmaktadır. Benzer şekilde, derslerde Endüstri 4.0 konulu içeriklerin uygulanma sıklığı ile Endüstri 4.0 bilgi düzeyi arasında da ($r=0,426$, $p<0,01$) orta şiddette pozitif bir ilişki olduğu görülmektedir. Endüstri 4.0 platformlarına üye olma durumu ile bilgi düzeyi ilişkisi için korelasyon katsayısı 0,242 bulunmuştur. Buradan hareketle, iki değişken arasında zayıf da olsa pozitif yönlü ilişki tespit edilmiştir.

		Correlations				
			Endüstri 4.0 Konusunda bilgi düzeyi	Endüstri 4.0 Proje çalışmalarına katılma durumu	Derslerde Endüstri 4.0 konulu içeriklerin uygulanma sıklığı	Endüstri 4.0 Platformlarına üye olma durumu
Spearman's rho	Endüstri 4.0 Konusunda bilgi düzeyi	Correlation Coefficient	1,000	,421**	,426**	,242**
		Sig. (2-tailed)	.	,000	,000	,008
		N	118	118	115	118
	Endüstri 4.0 Proje çalışmalarına katılma durumu	Correlation Coefficient	,421**	1,000	,406**	,251**
		Sig. (2-tailed)	,000	.	,000	,006
		N	118	118	115	118
	Derslerde Endüstri 4.0 konulu içeriklerin uygulanma sıklığı	Correlation Coefficient	,426**	,406**	1,000	,278**
		Sig. (2-tailed)	,000	,000	.	,003
		N	115	115	115	115
	Endüstri 4.0 Platformlarına üye olma durumu	Correlation Coefficient	,242**	,251**	,278**	1,000
		Sig. (2-tailed)	,008	,006	,003	.
		N	118	118	115	118

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Şekil 12. Endüstri 4.0’a ilişkin değişkenler arası korelasyon katsayıları için SPSS çıktısı

Ek olarak, ankete katılan öğrencilerin Endüstri 4.0 bilgi düzeyi ortalama puanları üzerinde çalışma durumunun etkisini sınamak amacıyla tek yönlü varyans analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlara Şekil 13’te yer verilmiştir. Öncelikle, normallik ve varyansların homojenliği varsayımları kontrol edilmiş ve varsayımlar sağlandığından varyans analizine geçilmiştir. Tek yönlü varyans analizi uygulanarak elde edilen sonuçlara göre; $p=0,201 > 0,05$ olduğundan tam ya da yarı zamanlı çalışan veya çalışmayan öğrencilerin Endüstri 4.0 konusundaki bilgi düzeyleri arasında %95 anlam düzeyinde anlamlı bir farklılık görülmemiştir. Endüstri 4.0

konusundaki bilgi düzeyleri arasında %95 anlam düzeyinde anlamlı bir farklılık görülmemesi, araştırmanın "homojen bir kütle" üzerinde yapılmış olduğunun bir göstergesi olup, güvenilirliğinin destekçisi olarak gösterilebilir.

Descriptives

Endüstri 4.0 Konusunda bilgi düzeyi

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
Çalışmıyor	98	2,8163	,70852	,07157	2,6743	2,9584	1,00	4,00
Yarı zamanlı	12	3,1667	,71774	,20719	2,7106	3,6227	2,00	4,00
Tam zamanlı	8	2,6250	,91613	,32390	1,8591	3,3909	1,00	4,00
Total	118	2,8390	,72760	,06698	2,7063	2,9716	1,00	4,00

Test of Homogeneity of Variances

Endüstri 4.0 Konusunda bilgi düzeyi

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
,606	2	115	,547

ANOVA

Endüstri 4.0 Konusunda bilgi düzeyi

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1,705	2	,853	1,628	,201
Within Groups	60,236	115	,524		
Total	61,941	117			

Şekil 13. Endüstri Bilgi Düzeyi ile Çalışma Durumu Değişkenleri için Tek Yönlü Varyans Analizine ait SPSS çıktısı

Son olarak, ankete katılan öğrencilerin Endüstri 4.0 bilgi düzeyi ortalama puanları üzerinde staj yapma durumunun anlamlı bir fark oluşturup oluşturmadığı bağımsız örneklem t-testi ile SPSS paket programı kullanılarak izleyen hipotezler aracılığıyla araştırılmıştır.

H₀: Staj yapmış ya da yapmamış olan öğrencilerin Endüstri 4.0 bilgi düzeyleri ortalamaları arasında anlamlı bir farklılık yoktur.
H₁: Staj yapmış ya da yapmamış olan öğrencilerin Endüstri 4.0 bilgi düzeyleri ortalamaları arasında anlamlı bir farklılık vardır.

Şekil 14'te görülen t-Testi sonuçlarına ($p=0,847>0,05$) dayanarak staj yapmış olanlarla yapmayanların Endüstri 4.0 Bilgi Düzeyi ortalamaları açısından %95 güven seviyesinde anlamlı bir farklılık bulunmadığı görülmektedir.

Group Statistics

	Staj_yapmış_olma	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Endüstri 4.0 Konusunda bilgi düzeyi	hayır	79	2,8481	,71770	,08075
	evet	39	2,8205	,75644	,12113

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Endüstri 4.0 Konusunda bilgi düzeyi	Equal variances assumed	,875	,352	,193	116	,847	,02759	,14298	-,25561	,31078
	Equal variances not assumed			,190	72,321	,850	,02759	,14557	-,26259	,31776

Şekil 14. Endüstri 4.0 Bilgi Düzeyi ile Staj Yapma Durumu Değişkenleri İçin t-Testi Analiz Sonuçları

5. Sonuç ve Öneriler

Bu araştırma, Sanayi Devriminin dördüncü aşaması olarak ifade edilen Endüstri 4.0 kavramının, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğrencilerinin bakış açısı ile incelenmesi üzerinedir. Sözü edilen öğrencilerin konu hakkındaki bilgi, ilgi ve algı düzeylerinin değerlendirilebilmesi için "Endüstri 4.0 Öğrenci Farkındalık Anketi" geliştirilmiştir. 118 katılımcıdan elde edilen veriler doğrultusunda, elde edilen bulgular "Endüstri 4.0 hakkında"; "Yazılım ve kodlama yeterliliği hakkında"; ve "Eğitimde ve müfredatta değişim hakkında" olmak üzere üç temel kategoride sınıflandırılabilir.

Endüstri 4.0 hakkında:

- Öğrencilerin Endüstri 4.0 hakkındaki bilgileri uzmanlık bilgisi olmaktan çok ilgiye ya da kişisel tecrübelerine dayalıdır. Yapay zekâ, bilgi teknolojisi, büyük veri, bilgisayar ağı, otomasyon, bilgi güvenliği, finansal teknoloji, sürdürülebilirlik, lojistik veri merkezi, bulut bilişim, nesnelerin interneti gibi Endüstri 4.0 bileşenleriyle ilgili ne düzeyde bilgi sahibi olduklarını belirtmesi istenen katılımcıların cevapları incelendiğinde, tüm bileşenlerde daha çok "orta" düzeyde bilgi

sahibi oldukları görülmüştür. Sadece “finansal teknoloji” ve “lojistik veri merkezi” bileşeni için “az” seçeneği daha çok tercih edilmiştir. Oysa, endüstri mühendisliği açısından lojistik faaliyetleri oldukça önemlidir ve lojistik konusundaki eniyileme çalışmaları gün geçtikçe daha fazla bilgi teknolojisi, otomasyon, bilgi sistemi gibi diğer Endüstri 4.0 bileşenlerinin yardımını içerecek hale gelmektedir. Ayrıca, bir endüstri mühendisi, modern Endüstri 4.0 unsurlarının kullanımı ve bilgisayarlarla çalışmanın rahatlığı da dâhil olmak üzere diğer özel becerilere sahip olmalıdır.

- Endüstri 4.0’ın gelecekteki olası etkileri hakkında fikirlerini belirtmeleri istenen öğrenciler oldukça çarpıcı cevaplar vermiştir. Örneğin robotların üretime katılımının artması ile insan gücüne duyulan gereksinimin azalacağı ve işsizlik sorunun ortaya çıkacağı öngörülmektedir. Verilen cevaplardan bazıları da bu endişeyi doğrulamaktadır. “Mavi yakının sonu” ifadesi bu korkuyu kanıtlar niteliktedir. Zaten işsizlik kaygısı içinde olan öğrenciler, öncelikle Endüstri 4.0’ın bu olumsuz tarafını görmektedirler.
- Bununla birlikte, yeni mesleklerin ve farklı iş konumlarının ortaya çıkması olasılığı ise işsizlik sorununa çözüm olarak görülmektedir. Aynı zamanda Endüstri 4.0 ile ortaya çıkması beklenen boş zaman, entelektüel birikim kazancı gibi olumlu katkılar da katılımcılar tarafından vurgulanmıştır.
- Öğrenci görüşlerinde belirtildiği üzere, üretim sektörü açısından, sistem izleme ile arızaların çok çabuk bulunup tamir edilmesiyle sağlanabilecek kaynak tasarrufu ve bununla birlikte çevreye verilecek zararın da en aza indirilebilmesi sistemin katkıları arasındadır.

Yazılım ve kodlama yeterliliği hakkında:

- Öğrenciler yazılım ve kodlama derslerinin önemli olduğunu belirtmekte, bununla birlikte bu konuda eğitim hayatlarında yeterli düzeyde bilgi edinemediklerini düşünmektedirler. Örneğin C, C++ ve C# dillerini hiç bilmediklerini belirten öğrenci sayısı sırasıyla 87, 86 ve 88’dir. Python dilini hiç bilmeyenler 105 kişidir. En çok bilinen dil, Visual Basic.Net olarak tespit edilmiş ancak, bunda da ortalama bilgi düzeyi orta seviyeyi geçememiştir. Ankette ayrıca bilinen başka dil olup olmadığı açık uçlu olarak sorulmuş Excel VBA, MySQL, az seviyede Java bildiğini yazan yalnızca 3 katılımcı olmuştur. Buradan çıkarılabilecek sonuç, öğrencilerin daha fazla yazılım ve kodlama öğrenmelerinin sağlanması, ders içeriklerinin bu konulara daha fazla yer vermesinin gerekli olduğu yönündedir. Ek olarak, kodlama yapılabilen bilgisayar programlarına ilişkin bilgi düzeyi ile seçmeli ders alınabilecek diğer mühendislik disiplinleri birlikte incelendiğinde, katılımcıların kodlama dilleri konusundaki yetersizliklerini, bilgisayar mühendisliği alanından seçilebilecek ek derslerle giderebilecekleri sonucuna varılmıştır.

Eğitimde ve müfredatta değişim hakkında:

- Endüstri 4.0, özellikle endüstriyel sistemlerin işleyiş şeklini önemli ölçüde değiştirmek için büyük bir potansiyele sahiptir. Bu değişime hazırlık için mühendis adaylarının; teknoloji ile bütünleşik, dijital okuryazarlığa yatkın, yenilikçi ürünler üretebilecek şekilde eğitilmesinin uygun olacağı görülmektedir. Endüstri 4.0’ın teknolojik unsurlarını endüstri mühendisliği adaylarının becerileriyle bütünleştiren müfredat planları oluşturulmasının gerekliliği üzerine durulmalıdır.
- Endüstri mühendislerinin, Endüstri 4.0 sistemlerinde ve geleneksel örgütlerde etkin bir şekilde çalışabilmeleri için, eğitimlerinde güncel konuların müfredatlarına dâhil edilmesi yararlı olacaktır. Örneğin, robotik laboratuvarlarının seçmeli ders gruplarına eklenerek, öğrencilerin endüstriyel robotlar ile robotik ve bilgisayar destekli uygulamalarını yakından tanıyıp becerilerini geliştirebilmeleri sağlanabilir.
- Ayrıca yazılım ve kodlama konusunda kendilerini yetersiz hisseden öğrenciler için müfredatın bu ihtiyaca yönelik güncellenmesi ya da bilgisayar mühendisliği bölümünden seçmeli dersler alınmasının teşvik edilmesi öğrencileri Endüstri 4.0 için daha donanımlı hale getirecektir.

Bu çalışmayla, ilk etapta öğrencilerin Endüstri 4.0 konusundaki farkındalığı, görüşleri ve bilgi düzeyleri ortaya konmaya çalışılmıştır. Bundan sonraki aşamada amaç, elde edilen bilgiler ışığında, öğretim üyelerinden ve sanayideki uzmanlardan da görüş alınması ile mevcut müfredatın iyileştirilmesi üzerine çalışmaların artırılması yönünde olacaktır. Yapılan analizlerde, öğrencilerin çalışma durumu ile Endüstri 4.0 bilgi düzeyi arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır. Katılımcıların %83,1’lik büyük bir kısmı çalışmadığından, böyle bir durumla karşılaşmıştır. Bu nedenle, sonraki çalışmanın mezun grupların görüşleri alınarak planlanması düşünülmektedir. Endüstri 4.0 ile birlikte işletmelerin aradığı çalışan profilinde değişiklik yaşanacağı açıktır. Sonuç olarak, Endüstri 4.0 ile birlikte işletmelerin beklentileri matematik ve fizik bilgisi ile donatılmış mühendislerden ziyade, problem çözme, analiz etme ve kişilere liderlik etme becerilerine sahip bireyleri bünyesine katma yönünde olacaktır.

Teşekkürler

ESOGU Endüstri mühendisliği öğrencilerine ve anketi öğrencilerine ileterek yardımcı olan tüm bölüm öğretim üyelerimize teşekkürü bir borç biliriz. Anketin tasarlanmasında görüşleriyle katkıda bulunan ve desteğini esirgemeyen değerli hocamız Prof. Dr. Nimetullah BURNAK'a da ayrıca teşekkürlerimizi sunarız.

Referanslar

- Acar, F. (2007). Öğrencilerin Eğitim Kalitesini Algılamaları: SERVQUAL Boyutlarının Analitik Hiyerarşi Süreci ile Önceliklendirilmesi. *Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 27, 319-328.
- Bahrin, M. A. K., Othman, M. F., Azli, N. N., & Talib, M. F. (2016). Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. *Jurnal Teknologi*, 78(6-13), 137-143.
- Banger, G. (2017). Endüstri 4.0-Ekstra. Ankara, Dorlion Yayınları
- Baygin, M., Yetis, H., Karakose, M., & Akin, E. (2016). An effect analysis of industry 4.0 to higher education. In *Information Technology Based Higher Education and Training, 15th International Conference, IEEE*.
- Benešová, A., & Tupa, J. (2017). Requirements for Education and Qualification of People in Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 2195-2202. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.366
- Braghirolli, L. F., Ribeiro, J. L. D., Weise, A. D., & Pizzolato, M. (2016). Benefits of educational games as an introductory activity in industrial engineering education. *Computers in Human Behavior*, 58, 315-324. doi: 10.1016/j.chb.2015.12.063
- Chen, C. K., Jiang, B. C., & Hsu, K. Y. (2005). An empirical study of industrial engineering and management curriculum reform in fostering students' creativity. *European Journal of Engineering Education*, 30(2), 191-202. doi: 10.1080/03043790500087423
- Erden, Z. (2008). A New Perspective to Design Education in Industrial Engineering: Product Design Projects at Freshman. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 9(1), 19-32.
- Erginel, N., Tekçe, M., Küçük, G., & Alper, A. (2016). Türkiye'de Endüstri Mühendisliği Mesleğine Bilimsel Açından Bir Bakış. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 27(1), 25-38.
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0: the industrial internet of things*. New York, Apress.
- Gu, F., Guo, J., Hall, P., & Gu, X. (2019). An integrated architecture for implementing extended producer responsibility in the context of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 57(5), 1458-1477. doi: 10.1080/00207543.2018.1489161
- Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 508-517. doi: 10.1080/00207543.2017.1351644
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6(4), 239-242. doi: 10.1007/s11576-014-0424-4
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 3, 18-23. doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001
- Loyalka, P., M. Carnoy, I. Froumin, R. Dossani, J. B. Tilak, & P. Yang. (2014). Factors Affecting the Quality of Engineering Education in the Four Largest Emerging Economies. *Higher Education*, 68(6), 977-1004. doi:10.1007/s10734-014-9755-8.
- Mokyr, J. (2018). *The Economics of the Industrial Revolution (Routledge Revivals)*. London, Routledge.
- Motyl, B., Baronio, G., Uberti, S., Speranza, D., & Filippi, S. (2017). How will Change the Future Engineers' Skills in the Industry 4.0 Framework? A Questionnaire Survey. *Procedia Manufacturing*, 11, 1501-1509. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.282
- Nagy, J., Oláh, J., Erdei, E., Máté, D., & Popp, J. (2018). The role and impact of Industry 4.0 and the internet of things on the business strategy of the value chain—the case of Hungary. *Sustainability*, 10(10), 3491. doi: 10.3390/su10103491
- Özüdoğru, A. G., Ergün, E., Ammari, D., & Görener, A. (2018). How Industry 4.0 Changes Business: A Commercial Perspective. *International Journal of Commerce and Finance*, 4(1), 84.

- Paravizo, E., Chaim, O. C., Braatz, D., Muschard, B., & Rozenfeld, H. (2018). Exploring gamification to support manufacturing education on industry 4.0 as an enabler for innovation and sustainability. *Procedia Manufacturing*, 21, 438-445. doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.142
- Richert, A., Shehadeh, M., Plumanns, L., Groß, K., Schuster, K., & Jeschke, S. (2016). Educating engineers for industry 4.0: Virtual worlds and human-robot-teams: Empirical studies towards a new educational age. In *Global Engineering Education Conference*, IEEE.
- Sackey, S. M., & Bester, A. (2016). Industrial engineering curriculum in Industry 4.0 in a South African context. *South African Journal of Industrial Engineering*, 27(4), 101-114. doi: 10.7166/27-4-1579
- Stearns, P. N. (2018). *The industrial revolution in world history*. London, Routledge.
- Stock, T., Obenaus, M., Kunz, S., & Kohl, H. (2018). Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential. *Process Safety and Environmental Protection*, 118, 254-267. doi: 10.1016/j.psep.2018.06.026
- Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*, 21(1), 22-37. doi: 10.1016/j.mattod.2017.07.001
- Uçar, U. U., & İşleyen, S. K. (2019) Türkiye'deki Endüstri Mühendisliği Eğitiminin Mezun Görüşlerine Dayalı Analizi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11(1), 109-123. doi: 10.29137/umagd.385030
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0—a glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233-238. doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.034
- Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., & Zhang, C. (2016a). Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer Networks*, 101, 158-168. doi: 10.1016/j.comnet.2015.12.017
- Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016b). Implementing smart factory of industry 4.0: an outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), 3159805. doi: 10.1155/2016/3159805
- Yin, Y., Stecke, K. E., & Li, D. (2018). The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 848-861. doi: 10.1080/00207543.2017.1403664
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. *Engineering*, 3(5), 616-630. doi: 10.1016/J.ENG.2017.05.015



Finite Element Analysis of Laminated Glass Plates Subjected to Impact Loading

Ebru Dural¹

¹Adnan Menderes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 09100, Aydın, TURKEY

Başvuru/Received: 16/09/2019

Kabul / Accepted: 20/12/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Abstract

Laminated glass is a type of glass formed by placing an intermediate layer, called PVB (polyvinyl butyral), between two or more glass plates. The joining of the layers takes place with the aid of heat and pressure. As a result of the processes carried out, the adhesion of the PVB appears and the layers appear as a single glass. Due to this feature of the intermediate layer, even if the glass breaks in the face of earthquake, storm, impact and similar events, it does not scatter around. As a result of the fracture, a spider web-like appearance is formed. Nevertheless, it is the least damaging of consequences such as the damage of living things. Laminated glass was first used in the automotive industry in 1914. Recently, there has been a noticeable increase in the use of many areas, especially in construction industry. The purpose of this work is to analyze effect of impact loads on mechanical behavior of laminated glass plates using finite element method. Laminated glass plate is analyzed as fixed supported. Results are presented in figures. As result of study, it is observed that geometry of impactor and the interlayer material are the factors that effect impact behavior of laminated glass unit.

Key Words

“Finite element method, Impact load, Laminated glass, Nonlinear behavior”

1. Introduction

Laminated glass was first used in the automotive industry in 1914. It consists of two or more thin glass layers and an intermediate layer which connects them as shown in Figure 1. Laminated glass provides strength against impact by revealing the adhesion feature with PVB interlayer. The intermediate layer keeps the broken glass parts together and prevents them from scattering. In this way, people are less likely to be harmed. The laminated glass plays an important role to provide protection from natural disasters such as earthquake, hurricanes and external forces arising from living things. In addition, UV rays are less permeable, which prevents sunlight from harming human health. Because of the mentioned properties, it has a history and future that goes back to the building sector. Nowadays, it continues to be produced using intermediate layers of different colors and thicknesses.

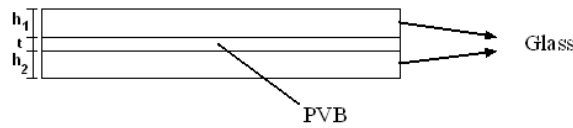


Figure 1. Laminated glass.

Laminated glasses exhibit highly nonlinear behavior under any loading because they can undergo deformation even under their own weight. Owing to this stresses develop on the mid-plane of the laminated unit and the differential equations, governs their behavior, become nonlinear. Also the big difference between elasticity modulus of the layers forming the laminate glass causes nonlinearity.

Impact is a common problem in construction, military, aerospace and automotive industries for brittle materials. Factors like, impact force, impact velocity, contact duration, displacement, acceleration, impact energy and energy absorption should be considered to evaluate the impact behavior. Current study aims to analyze behavior of laminated glass unit subjected to impact. The resistance capacity of laminated glass unit subjected to windborne debris impact is very high. Under impact loading the outer glass layer shatters while the inner glass layer remains unsheltered. The polyvinyl butyral interlayer absorbs the impact energy and keeps the glass layers in contact, thereby prevents damage, injury and even death of people.

In this study, different impactor geometries were applied to laminated glass under different velocities and the problem is modeled employing finite element method. The mechanical effects of the impact load on the laminated glass are analyzed. As a result, graphs of force, stress and deformation are obtained.

2. Literature Review

Usage of laminated glass in building industry has started to gain momentum and for this reason studies about them are increasing. In the last decades many researchers conducted studies to analyze the behavior of laminated glass. Most of the researchers performed experimental analysis of laminated glass units. [Hooper (1973), Behr et. al. (1985), Behr et. al (1993), Behr et. al. (1986)]. Besides the mentioned experimental studies there are limited theoretical study about the performance of laminated glass. Researchers, over the past three decades have conducted numerical studies in order to model the behavior of laminated glass. [Vallabhan et. al.(1993), Asik (2003), Foraboschi (2012), Asik and Tezcan (2005), Foraboschi (2007), Galuppi and Royer-Carfagni(2012)].

Understanding the breakage mechanism of glass, subjected to falling objects impact, and effect of impact loading to the use and design of glass unit is a fascinating subject for several researchers. Therefore the literature contains many experimental and analytical research on the impact behavior of laminated glass unit.

Minor and Reznik (1990) analyzed effect of glass type and thickness on the impact behavior of monolithic glass unit. They observed that breakage resistant of annealed monolithic glass unit was less than that of fully tempered monolithic unit. Behr and Kramer (1996) conducted a study to summarize impact behavior of laminated glass units. They concluded that at 129 km/h impact test velocity breakage probability of fully tempered glass is higher than that of heat strengthened glass.

Pantelides et.al (1993) analyzed post breakage performance of heat strengthened laminated glass systems subjected to impact loading. In 1996 Behr and Kremer conducted impact tests to understand the effect of interlayer thickness and glass type on the breakage of inner glass sheet. They observed that as the thickness of interlayer is increasing the breakage probability of inner glass subjected to wind borne debris impact decreases.

Flocker and Dharani (1997) analyzed laminated glass unit subjected to low velocity missile impact using finite element method. They used finite element method to analyze effect of glass geometry on the impact behavior of laminated glass unit. They concluded that, laminated glass consists of three layers, shows the best resistance to impact. They observed that with respect to thick outer ply, thin outer ply provides better impact resistance and reduces the probability of undesired interlayer debonding.

Behr et al. (1985) performed experimental studies about the low missile impact behavior of laminated glass to confirm the outcomes of finite element model developed by Flocker and Dharani [15]. The results are found quite close to each other.

Saxe et.al (2002) developed a model for sacrificial-ply-laminated glass units subjected to wind pressures and windborne debris impact. They observed that as the size and mass of the impactor is increasing the velocity which is necessary to break the inner-glass ply reduces and the kinetic energy which cause to fracture increases.

Timmel et. al. (2007) developed a computational model using explicit finite element model to impact performance of laminated glass unit. They performed experiments in order to validate their model.

Karunarathna (2013) conducted analytical and numerical method to analyze impact response of laminated and monolithic glass units subjected to low velocity missile impact.

Wang et al. (2017) compared four numerical method which used to analyze fracturing process of brittle glass. These methods are based on continuum and discontinuum categories. Also they compared the FEM and DEM models by experimental results for glass unit subjected to high speed and oblique impact tests.

Yuan at al. (2017) developed an analytical model to analyze low velocity impact behavior of rectangular laminated glass which shows non linear behavior and glass fracture. They observed that laminated glass bonded by stiffer interlayer material leads to greater contact force and less transverse displacement.

3. Material and Method

3.1. Finite Element Modelling

From the above explanations, it may be concluded that many studies have been conducted for the impact analysis of laminated glass units. In this study, a finite element method based software, ABAQUS, is employed to model and analyze the effect of different missile types, different interlayer material on the dynamic impact behavior of laminated glass unit. Many of the physical problems in the nature may be represented by partial differential equations. Some of these equations may be very complicated to solve using mathematical methods. Finite element method is a very useful tool used to solve the mentioned complicated differential equations. In the finite element method the unit is divided of small elements and for each of mentioned small elements an approximation is made.

Inner and outer glass plies, PVB interlayer and impactor are modeled as different parts. The glass layers and interlayer are modeled using three dimensional deformable options. The laminated glass unit considered has dimensions of 1 m × 1 m (see Figure 2). Each glass ply has a thickness of 6 mm. The interlayer thickness is 0.76 mm. The total thickness of the unit is 12.76 mm. The beam materials, glass and interlayer, are assumed as completely elastic and obey Hooke's law. The Young's modulus and Poisson's ratio of glass are taken to be 74.4 GPa and 0.24, respectively. Young's modulus and Poisson's ratio of the PVB interlayer are taken as 6.3 MPa and 0.4, respectively. For EVA interlayer Young's modulus and Poisson's ratio of the PVB interlayer are taken as 15.7 MPa and 0.48, respectively. The density of glass, PVB and EVA are specified to 2500 kg/m³, 1100 kg/m³ and 943 kg/m³, respectively. The three dimensional model is generated and solved with ABAQUS. To perform large deformation analysis "geometric nonlinearity" option is used. The bond between the interlayer and glass plies is assumed to be perfect with no debonding or slipping during impact. A hexahedral element and sweep mesh pattern is applied for mesh of laminated glass unit. Twenty node quadratic brick elements (C3D20R) are used in meshing because the program gives more accurate results where large faster convergence. Biased mesh is used in the developed model since fine mesh is required to obtain more accurate results at the neighborhood of impact area. For this reason, unstructured mesh is used in the developed model. In the literature some researchers like Kim et.al (1997) used unstructured mesh pattern in their studies.

An analysis is conducted to obtain optimum number of mesh elements required for convergent solution. Result of conducted mesh analysis can be seen from Figure 2 for laminated glass unit subjected to spherical impactor. The laminated glass unit has one mesh for each layer along the thickness direction. The approximate element size is 0.0075 m. and the laminated unit is divided into nearly 63000 elements to obtain convergence while the impactor is divided nearly 13000 elements. The laminated glass plate and impactor element arrangements are illustrated in Figure 4. It is well known that the mesh density plays an important role in the simulation. A refine mesh technique is applied in the contact zone since the role of mesh density plays an important role in the analysis. In order to create a finer mesh around the impact region a circular partition section is used at the center of plate unit. The boundaries are modeled as fixed edge. At the fixed ends of the unit, vertical and horizontal degrees of freedom of all the nodes of the unit are set to be zero. To define the initial condition, predefined field option is used instead of boundary condition option. In order to prevent the initial conditions like displacement and velocity stay constant during the simulation instead of boundary condition option, predefined field option is used.

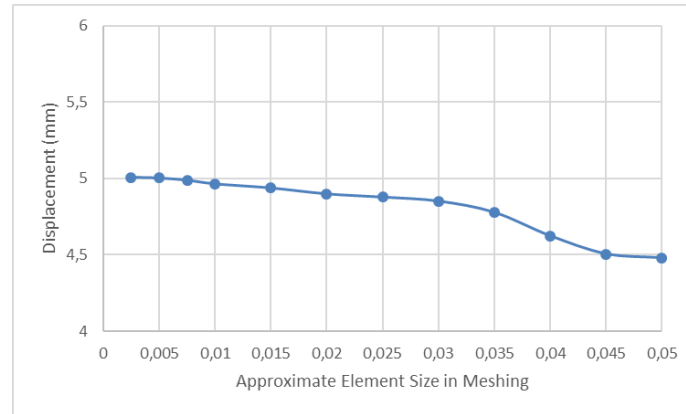


Figure. 2. Approximate element size versus Displacement

Two different types of impactors are used in the current study. Cylindrical and spherical impactors are modeled as 3D solid with mass of 1kg. The behavior of impact object is assumed as a rigid body during the analysis. In other words, during the impact process the amount of deformation will be neglected. The whole rigid impactor is controlled by a single point called as reference point and the impact velocity are also assigned at the defined reference point in this simulation.

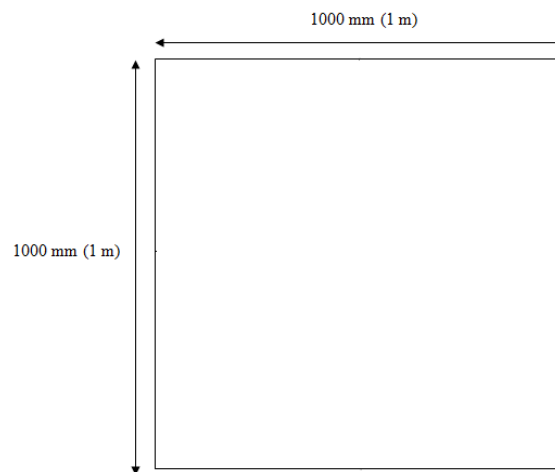


Figure. 3. Plate model

Impact problems may be solved using implicit or explicit algorithms which are available in the used package program. In this study the model is developed using explicit scheme.

In the literature, the impactor modelled using three different approaches:

- The material property may ignored and the impactor may be modelled as fully rigid.
- The impactor may be modelled as rigid body with material property,
- The impactor may be modelled as deformable with assigned property.

In the current study the impactor is modeled as fully rigid. Impact is a phenomenon which occurs in a very short time duration. Because of this reason, impact responses like displacement, stress, forces, energy dissipation and damage vary with time. Although the deformable model leads more realistic results many researchers Liu and Liaw [19] modeled it as rigid body because of the negligible deformation of impactor.

To analyze the influence of impactor geometry two different types of impactors such as spherical and cylindrical are investigated in the current study. The spherical impactor and flat ended cylinder mass diameters are 0.05 m. The mass of projectile is 1 kg and period is 0.0001 seconds. To define boundary conditions of the impactor except the translation in vertical direction the translations and rotations in other directions are set to be zero. Since the impactor is modeled as rigid a reference point is defined to specify the mass of the impactor. Predefined field option is used to specify the velocity of impactor. The impact velocity range of the projectiles are 0-50 m/s in the analyzes. The velocity increment is 5 m/s in the analysis.

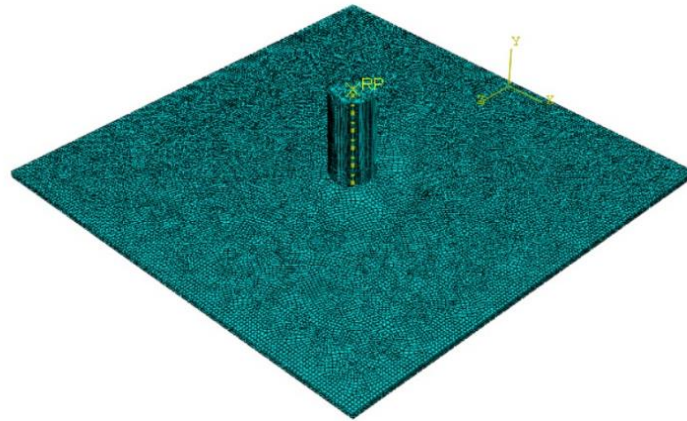


Figure. 4. Mesh of laminated glass and cylindrical impactor.

4. Results

The main purpose of this paper is to analyze effect of impactor geometry, velocity and different interlayer materials on the impact behavior of laminated glass plate structures. There are many different types of interlayer on the laminated glass market. Ethylene vinyl acetate (EVA) and polyvinyl butyral (PVB) are the most common binding material used in laminated glass market. In most of the earlier work PVB is used as the bonding material in glazing industry but usage of EVA as bonding material show dramatic increase because of its some advantageous properties. In the current research study, to investigate the effect of interlayer material on the behavior of laminated glass subjected to the impact loading two different types of interlayer, PVB and EVA, are considered. Also impact response of laminated glass is studied for various impactor geometries. Cylindrical and spherical impactors are used in this study. Schematic representation of laminated glass analyzed in this study, is given in Figure 5. Figure 5.a and Figure 5.b show the laminated glass subjected to the spherical and cylindrical impactor geometry, respectively. To consider the effect of interlayer type on the impact behavior of laminated glass plate the problem is solved for laminated glass unit with interlayer EVA as shown in Figure 5.c and Figure 5.d.

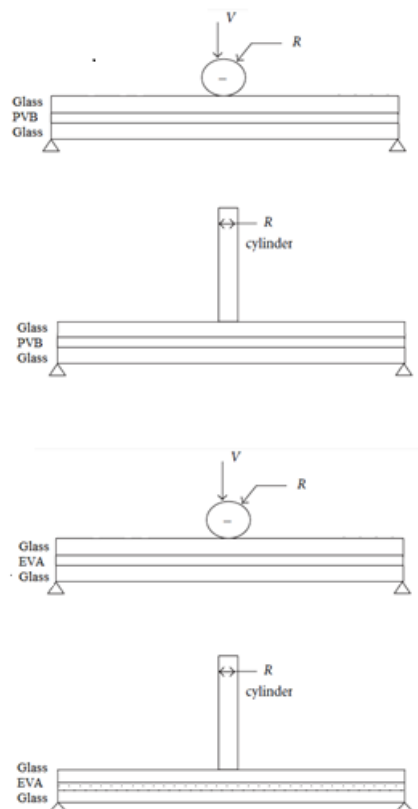


Figure. 5. Laminated glass subjected to **a)** spherical impactor **b)** cylindrical impactor **c)** laminated glass bonded by interlayer EVA subjected to cylindrical impactor **d)** laminated glass bonded by interlayer EVA subjected to spherical impactor.

The displacements and stresses from the finite element program are saved and imported into EXCEL to plot diagrams. Figures 6 and 7 are plotted to analyze the behavior of laminated glass subjected to spherical impactor. It can be observed from the figures that as the velocity is increasing the displacement values increase linearly while maximum principal stress values increase non-linearly. Displacements and stresses are maximum at the center of unit. The nonlinear behavior can be observed from the figures. As can be seen from Figure 8 maximum principal stress contours get their maximum values at the center of plate unit.

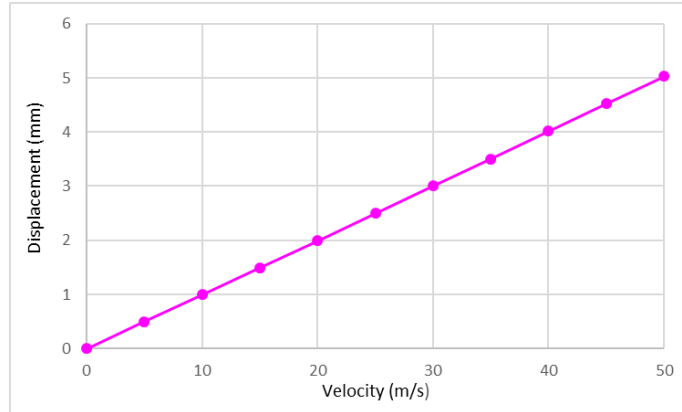


Figure 6. Maximum displacement versus velocity for laminated glass subjected to spherical impactor.

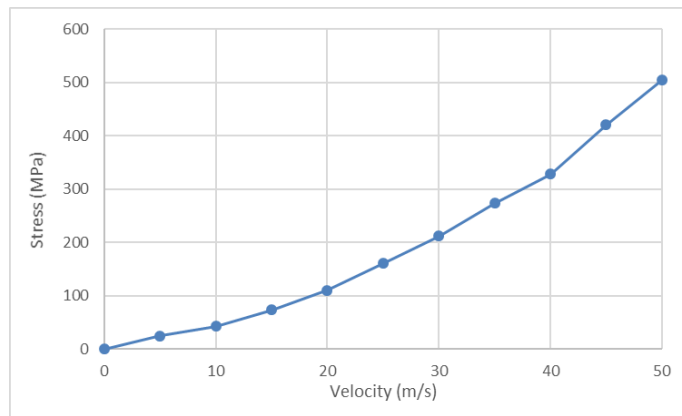


Figure 7. Maximum stress versus velocity for laminated glass subjected to spherical impactor.

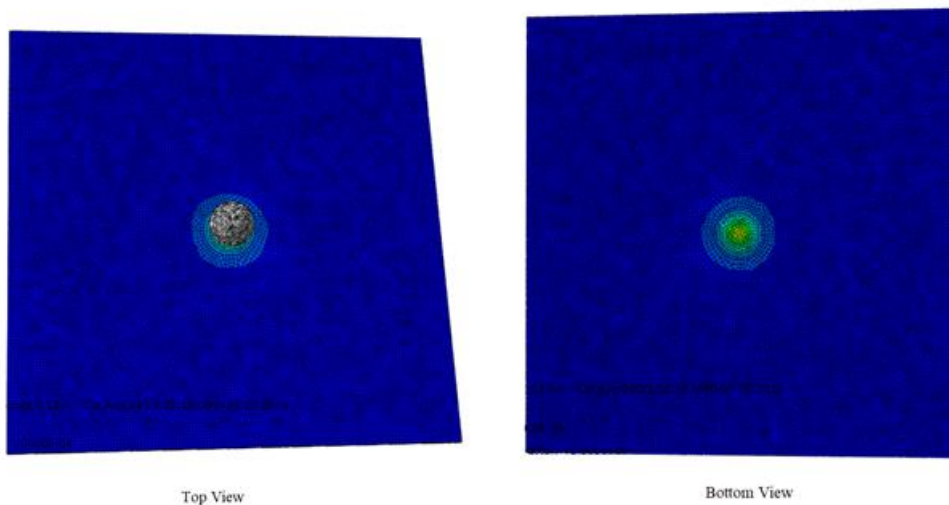


Figure 8. A view of contours of principal stress acquired from ABAQUS for laminated glass subjected to spherical impactor.

Behavior of laminated glass plate subjected to the cylindrical impactor are given in Figures 9 and 10. While the stress values of spherical and cylindrical impactor are nearly equal to each other for 40 m/s velocity, the stress values of spherical impactor are smaller than those of cylindrical impactor for other velocities. Displacements show reverse pattern. The displacements of cylindrical impactor are nearly 1.7 times higher than those of spherical ones. Since the mass of the rigid impactors are same we can say that the geometry of impactor affects the impact behavior of laminated glass unit. It is clear from above figures that when laminated unit, bonded with PVB, subjected to cylindrical impactor it deflects more than the unit subjected to spherical impactor. Figure 11

shows the distribution of principal stress contours on the plate surface. The principal stresses get their maximum value at the center of the outer glass surface.

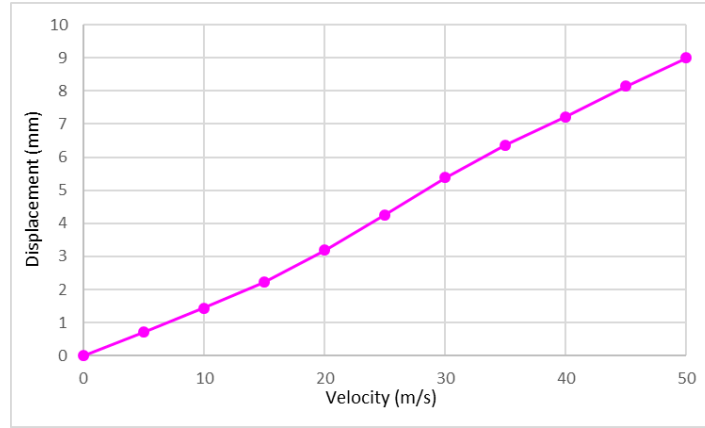


Figure 9. Maximum displacement versus velocity for laminated glass subjected to cylindrical impactor.

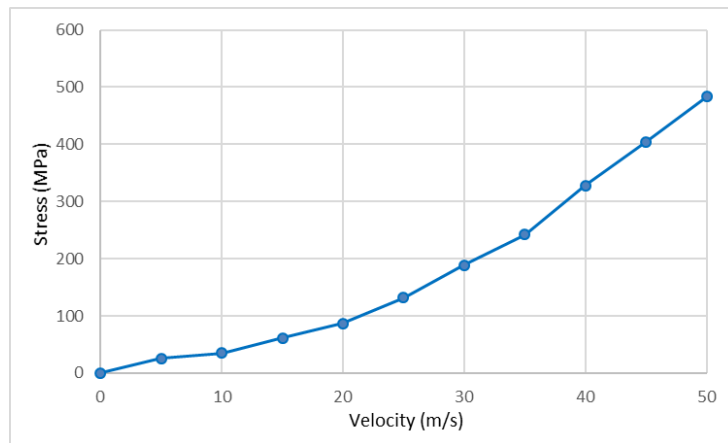


Figure 10. Maximum stress versus velocity for laminated glass subjected to cylindrical impactor.

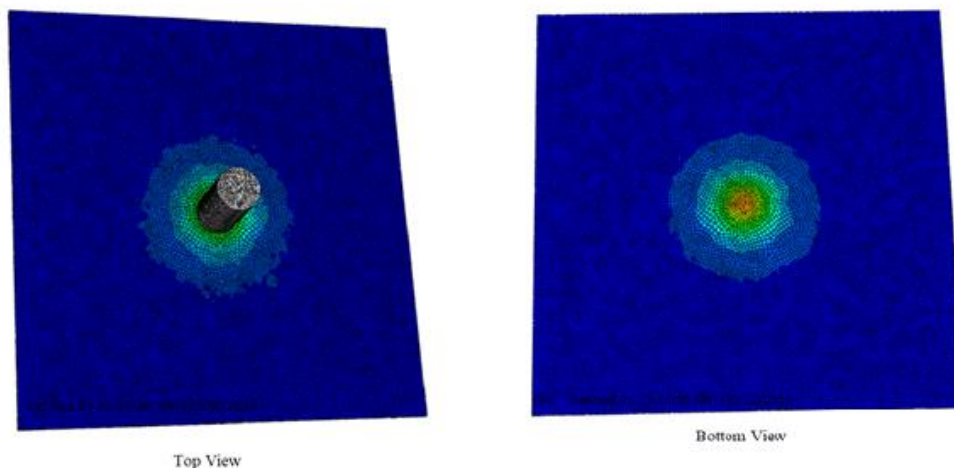


Figure 11. A view of contours of principal stress acquired from ABAQUS.

Laminated glasses contain two glass panes joined by a visco elastic interlayer. There are different types of interlayers used in lamination process. In order to analyze the effect of interlayer material on the behavior of laminated glass plate subjected to impact loading two types of interlayer, ethylene vinyl acetate film (EVA) and polyvinyl butyral (PVB), are used in the current study. Figures 12 – 13 and 15 - 16 are plotted to illustrate the displacement and stress values for laminated unit, bonded with EVA, subjected to cylindrical and spherical impactor, respectively. It is observed from the below figures that displacement and stress values of laminated glass unit which contains EVA as binding material are greater than those of contain PVB as binding material. It may be concluded that impact resistance of PVB interlayer are greater than that of EVA. Figures 14 and 17 illustrate the principal stress contours on the plate surface for laminated unit subjected to cylindrical and spherical impactor, respectively. As we mentioned above, principal stress of laminated glass unit, bonded with PVB, are maximum at the center of laminated glass plate. The same trends also can be observed for the laminated glass bonded with EVA .

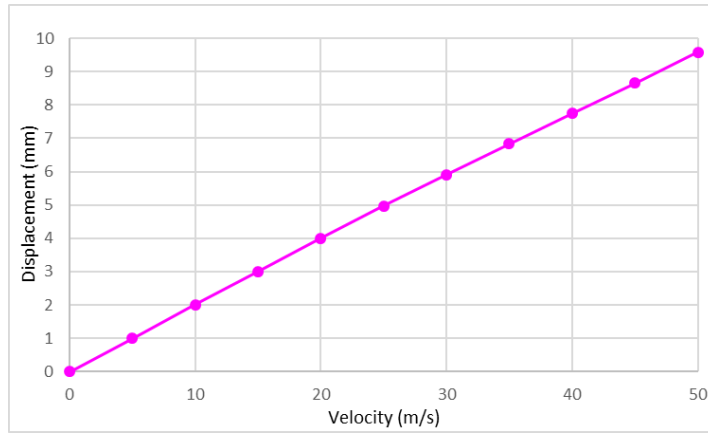


Figure. 12. Maximum displacement versus velocity for laminated glass, contains EVA as binding material, subjected to cylindrical impactor.

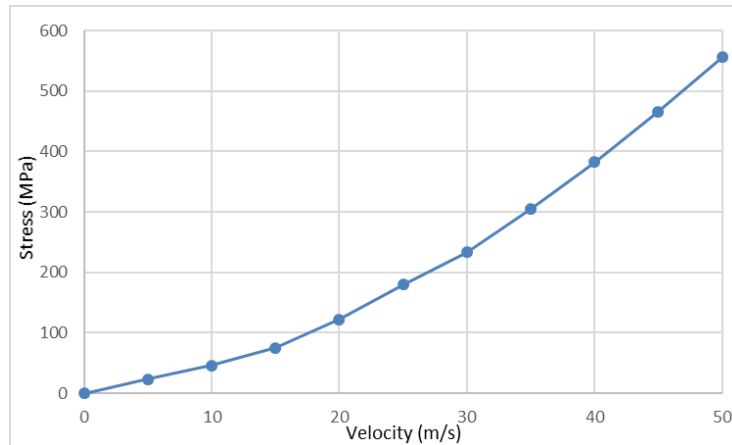


Figure 13. Maximum stress versus velocity for laminated glass contains EVA as binding material, subjected to cylindrical impactor.

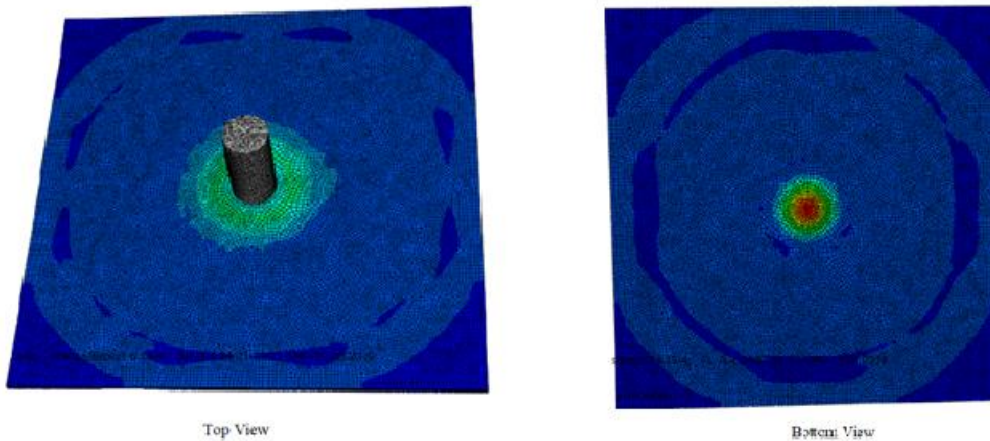


Figure. 14. A view of contours of principal stress acquired from ABAQUS for laminated glass contains EVA as binding material.

Behavior of laminated glass which contains EVA as interlayer material subjected to spherical impactor may be analyzed from the figures given below. Displacement and stress values for varying velocities are plotted in Figures 15 and 16, respectively. It is observed from the figures that stress and deflection values of laminated glass unit which contains EVA as binding material are greater than those of contain PVB as binding material. It may be concluded that impact resistance of PVB interlayer are greater than that of EVA. Above figures present that, displacement and stress values of laminated unit, bonded with EVA, is greater when it is subjected to cylindrical impactor.

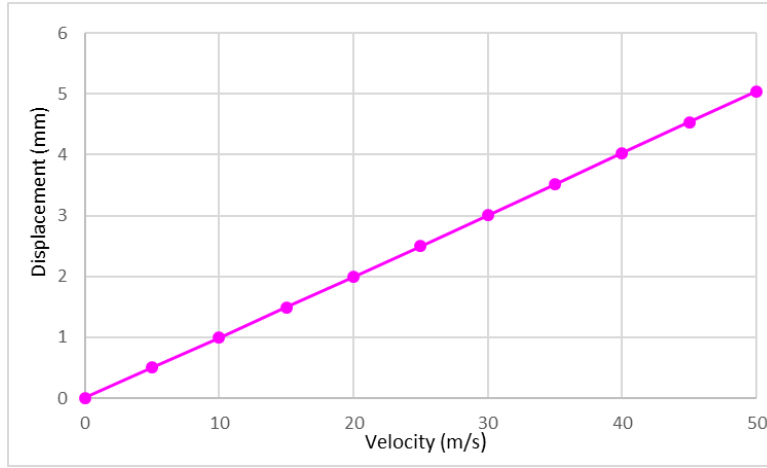


Figure. 15. Maximum displacement versus velocity for laminated glass, contains EVA as binding material, subjected to spherical impactor.

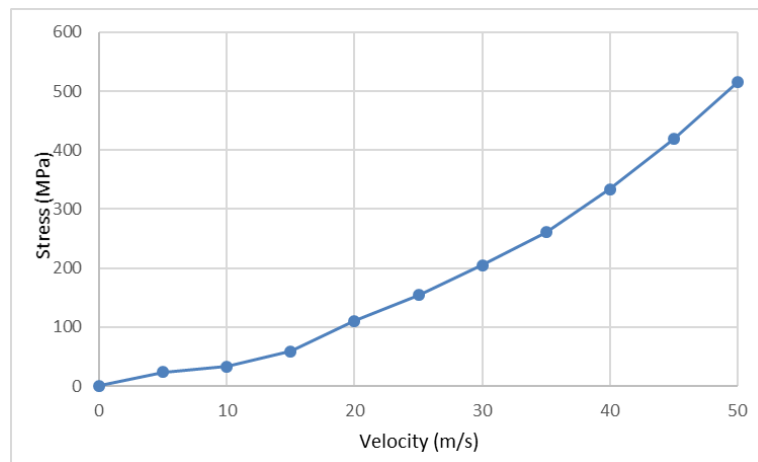


Figure. 16. Maximum stress versus velocity for laminated glass contains EVA as binding material, subjected to spherical impactor.

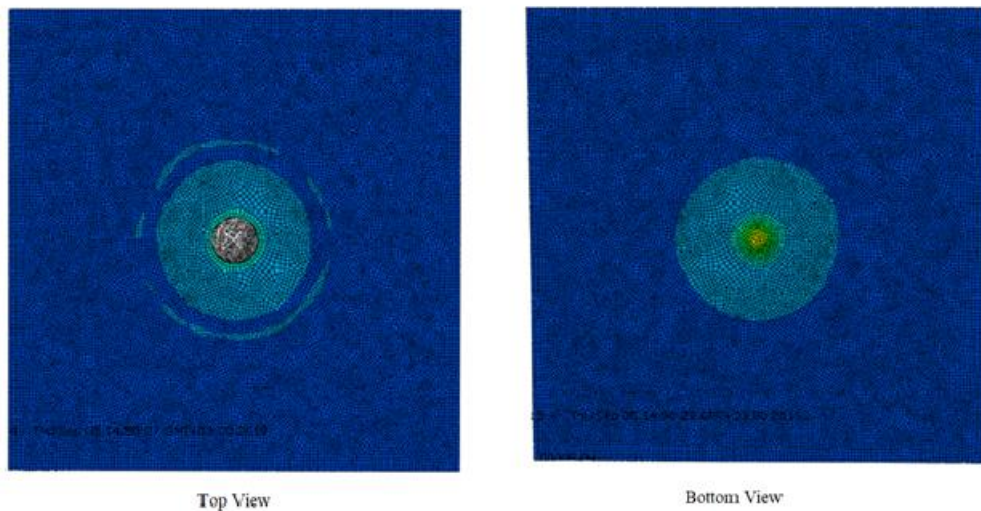


Figure. 17. A view of contours of principal stress acquired from ABAQUS for laminated glass contains EVA as binding material.

Because of the importance of mesh density a partition is created at the contact zone and refined mesh technique was applied in that contact zone. The mesh and element arrangement of each components is shown in Figure 18. Figures 19 and 20 are plotted to analyze stress and displacement time histories at the center of partition which is created at the contact region. Time history curves are plotted by considering 5 m/s, 20 m/s and 40 m/s impact velocities. The stresses and displacements take their maximum value are maximum at the center of the contact zone. Time period is 100 μ s. As the impact velocity is increasing, the peak displacement and stress response. The displacement increase for increasing time and they have unsymmetric nature. It can be observed that the

displacement of laminated glass unit significantly increase with increasing impact velocity. The peak stress and displacement responses increase with increasing impact velocity. Principal stresses take both positive and negative values for some velocities. The principal stresses of laminated glass unit subjected to cylindrical impactor take both positive and negative values for 40 m/s velocity while they are positive for 5m/s and 20 m/s velocities. The maximum stresses are compression at the top glass surface as expected. It is also observed from the figure that as the impact velocity is increasing the value of maximum principal increases. On the time history curve there are jumps for some certain time values.

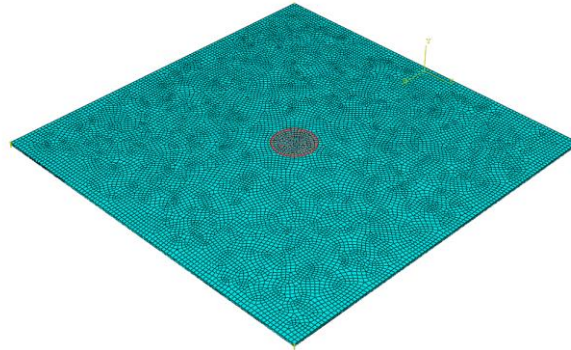


Figure. 18. Laminated glass plate and set created at the contact zone.

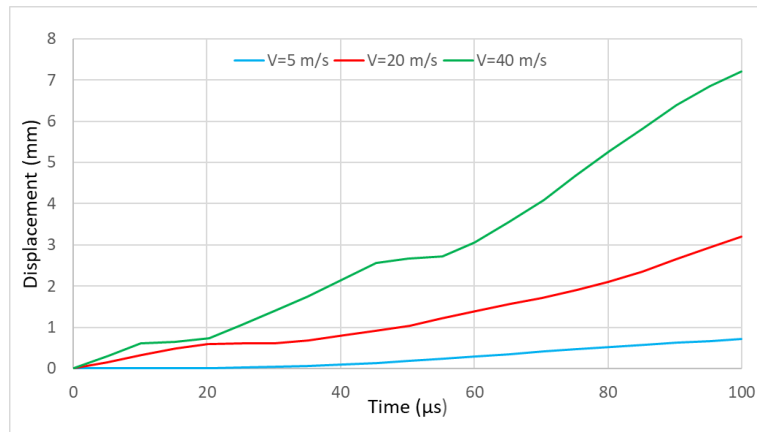


Figure. 19. Displacement time history for laminate glass plate subjected to cylindrical impactor.

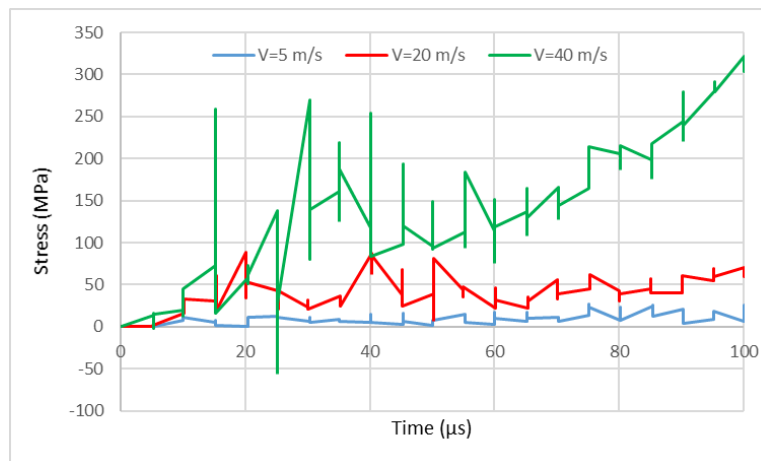


Figure. 20. Principal stress time history for laminate glass plate subjected to cylindrical impactor.

Figures 21 and 22 depict principal stress and displacement histories for laminated glass plate subjected to spherical impactor by considering 5 m/s, 20 m/s and 40 m/s impact velocities. The impact duration for impact is 100μ seconds. It is observed from the figures that displacements and stresses take their maximum values between 0 and 0.0001 seconds. As time is increasing the peak value of displacements increase. While displacement-time history of laminated glass is subjected to cylindrical impactor is a smooth line; it is twisted for laminated glass unit subject to spherical impactor. Similar to the behavior of unit subjected to cylindrical impactor the principal stress curves of spherical impactors have jumps.

Figures 23 and 24 are plotted to observe variation of displacement and stress versus time for laminated glass with interlayer EVA subjected to cylindrical impactor while Figures 25 and 26 are plotted the same unit subjected to spherical impactor for 5 m/s, 20

m/s and 40 m/s impact velocities. It is clear from figures that the higher the velocity, the higher the maximum stress and displacement values. As can be seen from the figures that character of displacement- time history curves is depend on the geometry of impactor. While they are smooth for spherical impactor, they are twisted for cylindrical impactor. The principal stress-time history of laminated glass bonded with EVA subjected to cylindrical impactor shows some difference since sharp sudden drops are not observed from the stress curve for 20m/s and 40 m/s velocities.

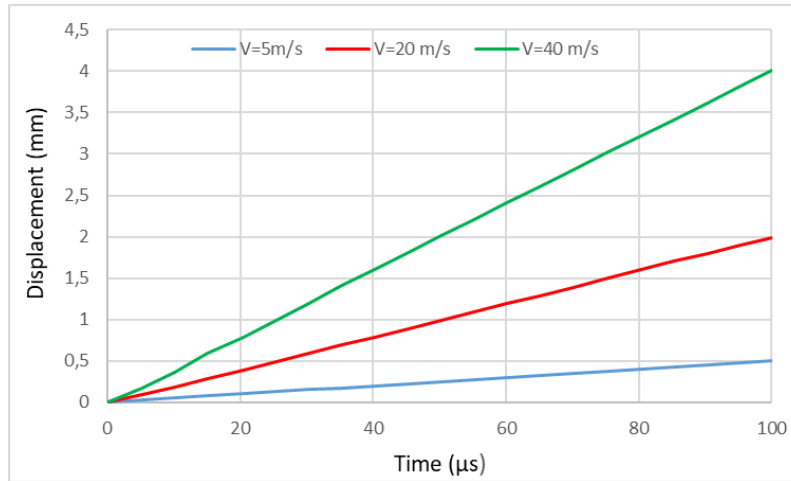


Figure. 21. Displacement time history for laminate glass plate subjected to spherical impactor.

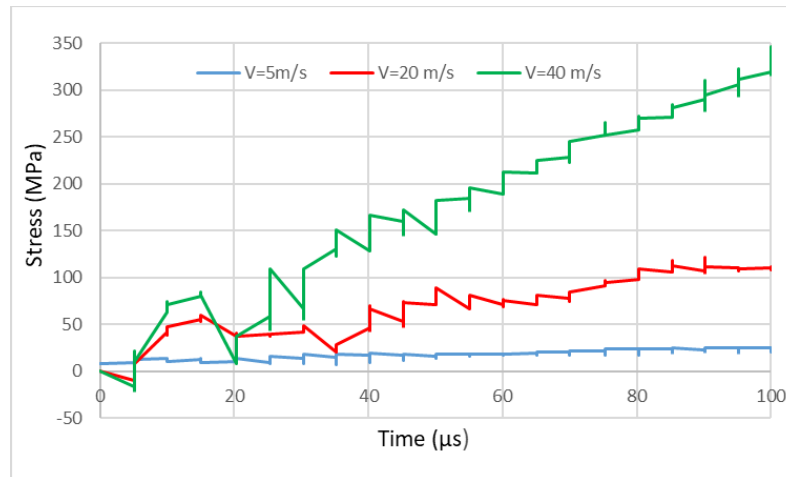


Figure. 22. Principal stress time history for laminate glass plate subjected to spherical impactor.

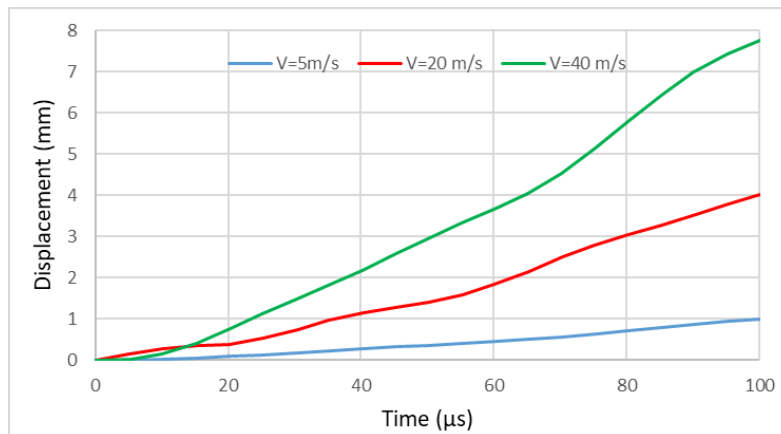


Figure. 23. Displacement time history for laminate glass plate with interlayer EVA subjected to cylindrical impactor.

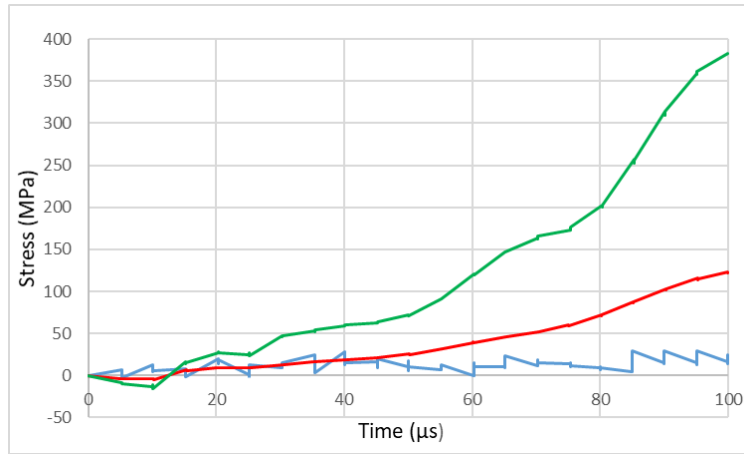


Figure. 24. Principal stress time history for laminate glass plate with interlayer EVA subjected to cylindrical impactor.

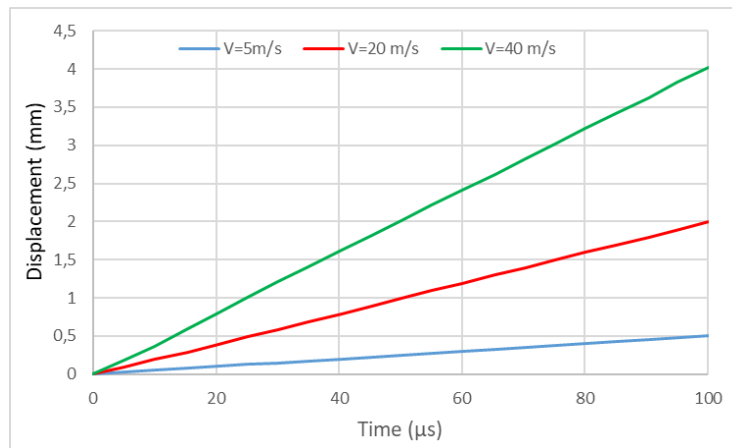


Figure. 25. Displacement time history for laminate glass plate with interlayer EVA subjected to spherical impactor.

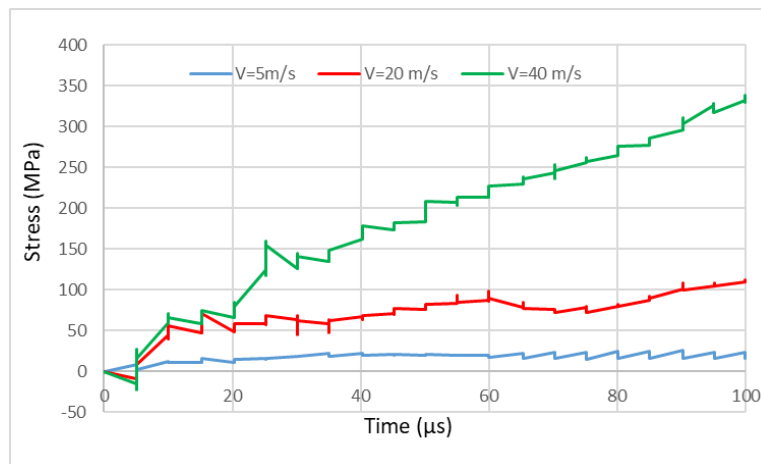


Figure. 26. Principal stress time history for laminate glass plate with interlayer EVA subjected to spherical impactor.

The internal energy is very important to prepare the system to a given state in real life. The amount of internal energy time history curves for laminated units subjected to cylindrical and spherical impactors are shown in Figures 27 and 28, respectively. It is obvious from the figures that the laminated glass subjected to cylindrical impactor absorbs more energy than those subjected to spherical impactor.

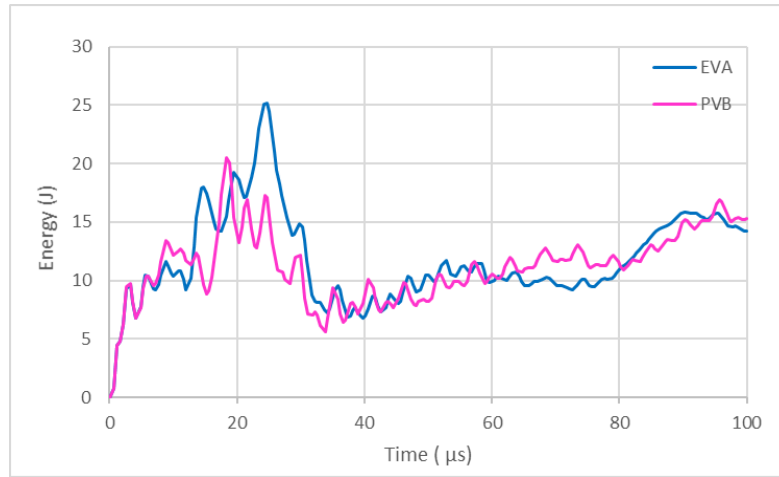


Figure. 27. Energy time history for laminate glass plate subjected to cylindrical impactor.

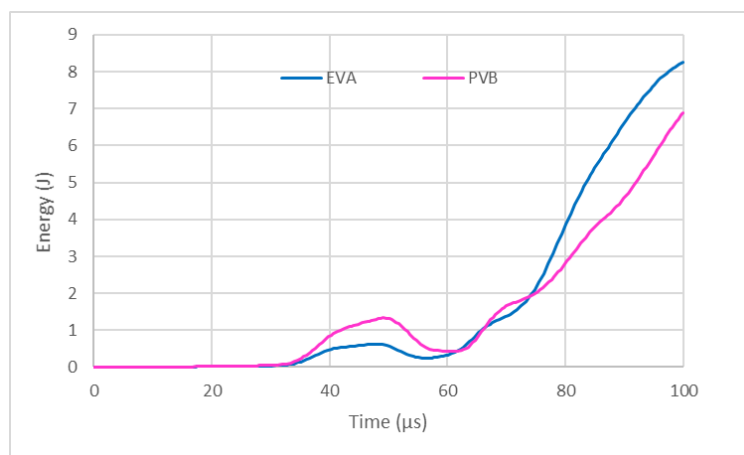


Figure. 28. Energy time history for laminate glass plate subjected to spherical impactor.

5. Discussion and Conclusion

In this study, impact response of laminated glass plate, subjected drop weight, was studied by using the finite element method. Commercial finite element package program ABAQUS was used in the study. 3D finite element model is developed to analyze the effect of impactor geometry and interlayer type on the impact response of laminated glass plate. In the current study analysis are carried out for velocities between 0-50 m/s. This means in this study low velocities are considered. Impact responses of principal stress and displacement were investigated for impact parameters like velocity, impactor geometry and interlayer type. From the conducted analysis it is observed that impactor geometry, interlayer type and velocity are factors which affect the impact behavior of laminated glass unit.

The conclusions obtained from this investigation are:

- Stress and displacement values of laminated unit bonded by EVA greater than those of PVB.
- Laminated glass unit subjected to cylindrical impactor absorbs more internal energy than those of subjected to spherical impactor.
- Geometry of impactor is an important factor affects the character of displacement- time history curves.
- Displacement and stress of laminated glass unit significantly increase with increasing impact velocity.
- Character of displacement- time history curves is depend on the geometry of impactor

Acknowledgement

This work has been funded by the Adnan Menderes University Department of Scientific Research Council, Turkey.

References

Aşık, M.Z. (2003). Laminated glass plate: revealing of nonlinear behavior. *Computers and Structures*, 81, 2659-2671. doi:0.1016/S0045-7949(03)00325-0

- Aşık, M.Z. & Tezcan, S. (2005). A mathematical model for the behavior of laminated glass beams. *Computers and Structures*, 83, 1742-1753. doi:10.1016/j.compstruc.2005.02.020
- Behr, R. A., Kremer, P. A., Dharani L. R., Ji F. S. & Kaiser N. D. (1999). Dynamic strains in architectural laminated glass subjected to low velocity impacts from small projectiles. *Journal of Materials Science*, 34, 5749–5756. doi:10.1023/A:1004702100357
- Behr, R.A. & Kremer, P.A. (1996) Performance of Laminated Glass Units under Simulated Windborne Debris Impacts. *Journal of Architectural Engineering*, 2(3), 95-99. doi: 10.1061/(ASCE)1076-0431
- Behr, R.A., Minor, J.E., Linden, M.P. & Vallabhan, C. V. G. (1985).Laminated glass units under uniform lateral pressure. *Journal of Structural Engineering*, 111(5), 1037-1050. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:5(1037)
- Behr, R.A., Minor, J.E. & Norville, H.S. (1993). Structural behavior of architectural laminated glass. *Journal of Structural Engineering*, 119(1), 202-222. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:1(202)
- Behr, R.A., Linden, M.P. & Minor, J.E. (1986). Load duration and interlayer thickness effects on laminated glass. *Journal of Structural Engineering*, 112(6), 1441-1453. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1986\)112:6\(1441\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1986)112:6(1441))
- Flocker, F.W. & Dharani, L.R. (1997) Stresses in laminated glass subject to low velocity impact. *Engineering Structures*, 19(10), 851-856. doi: 10.1016/S0141-0296(97)00162-4
- Foraboschi, P. (2012). Analytical model for laminated-glass plate. *Compo Part B: Eng.*, 43(5), 2094-2106 .doi: 10.1016/j.compositesb.2012.03.010
- Foraboschi, P. (2007). Behavior and Failure Strength of Laminated Glass Beams. *Journal of Engineering Mechanics*, 133 (12), 1290-1301. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:12(1290)
- Galuppi, L. & Royer-Carfagni, G. (2012). Laminated beams with viscoelastic interlayer. *Int. J. Solid Struct.*, 49, 2637-2645. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2012.05.028
- Hooper, J.A. (1973). On the bending of architectural laminated glass. *Int. J. Mech. Sci.*, 15, 309-323. doi: 10.1016/0020-7403(73)90012-X
- Karanurathna, K.A. (2013). Low -Velocity Impact Analysis of Monolithic and Laminated Glass Using Finite Element Method, MS Thesis, University of Birmingham, Birmingham, United Kingdom.
- Kim, S.J., Goo, N.S. & Kim, T.W. (1997). The effect of curvature on the dynamic response and impact-induced damage in composite laminates. *Compos Sci Technol*, 51, 763–73. doi: 10.1016/S0266-3538(97)80015-2
- Liu, Y. & Liaw, B. (2009). Drop-weight impact tests and finite element modeling of cast acrylic plates. *Polymer Testing*, 28, 599-611. doi:10.1016/j.polymertesting.2009.04.008
- Minor, J. E. & Reznik, P. L. (1990). Failure Strength of Laminated Glass. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 116(4), 1030-1039. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:4(1030)
- Pantelides, C. P., Horst, A. D. & Minor, J. E. (1993). Postbreakage Behavior of Heat Strengthened Laminated Glass under Wind Effects *J. Struct. Eng.*, 119(2), 2425-2435. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:2(454)
- Saxe, T.J., Behr, R.A., Minor, J.E., Kremer, P.E. & Dharani, L.R. (2002). Effects of Missile Size and Glass Type on Impact Resistance of “Sacrificial Ply” Laminated Glass. *Journal of Architectural Engineering*, 8(1), doi: 10.1061/(ASCE)1076-0431(2002)8:1(24)
- Timmel, M., Kolling, S., Osterrieder, P. & Du Bois, P.A. (2007). A finite element model for impact simulation with laminated glass. *International Journal of Impact Engineering*, 34(8), 1465–1478. doi:10.1016/j.ijimpeng.2006.07.008
- Vallabhan, C.V.G., Das, Y.C. , Magdi, M. & Asik M.Z. (1993). Analysis of laminated glass units. *Journal of Structural Engineering*, 119(5), 1572-1585. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:5(1572)
- Yuan, Y., Xu, C., Xu, T., Sun, Y., Liu, B. & Li, Y. (2017). An analytical model for deformation and damage of rectangular laminated glass under low-velocity impact. *Composite Structures*, 176, 833–843. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.029>
- Wang, X., Yang, J., Liu, Q., Zhang, Y. & Zhao, C. (2017). A comparative study of numerical modelling techniques for the fracture of brittle materials with specific reference to glass. *Engineering Structures*, 152, 493-505 <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.050>



4 Nisan 2019 Elazığ-Sivrice Depreminin Yığma Yapılara Etkisinin Değerlendirilmesi

Evaluation of The Effect of The Elazığ-Sivrice Earthquake Dated 4 April 2019 On Masonry Structures

Melek Akgül¹, Orhan Doğan²

¹Munzur Üniversitesi Tunceli MYO, 62000, Tunceli, TÜRKİYE
²Kırıkkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 18/09/2019

Kabul / Accepted: 23/12/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

4 Nisan 2019 tarihinde, 5.2 büyüklüğünde, Doğu Anadolu Fayı üzerinde, merkez üssü Elazığ-Sivrice olan, bir deprem meydana gelmiştir.

Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin kırsal kesimlerinde ve şehirlerin kenar mahallelerinde, yapı stoğunun büyük bir kısmı, depreme karşı etkin olmayan moloz taşlardan inşa edilmiş duvar yapılarından oluşmaktadır. Yatay deprem yükleri ile artan bileşke kuvvetler, yığma duvarlarda özellikle çekme bağları çok zayıf olan derz noktalarında çekme çatlaklarına yol açar.

Bu çalışmada, söz konusu bölgenin kırsalında yer alan yığma yapılarda, yetersiz hatıl uygulamaları, farklı özellikli malzemelerin kullanımı, düşük kaliteli örgü malzemesi, yetersiz köşe kilitlenmeleri, döşemenin betonarme olmaması gibi nedenlerden dolayı, meydana gelen farklı hasar tipleri tespit edilmiştir. Hasarların büyük oranda Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018'de (TBDY-2018) belirtilen düzensizliklerden kaynaklandığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“Elazığ-Sivrice depremi, yığma yapılar, hasar değerlendirme, düzlem dışı davranış, düzlem içi davranış”

Abstract

On April 4, 2019, an earthquake of 5.2 magnitude occurred on the East Anatolian Fault with a epicenter of Elazığ-Sivrice. In the slums of the cities and in the rural areas of Eastern and Southeastern Anatolia, a large percentage of the building stock is composed of masonry structures constructed with rubble stones that do not act against the earthquake. Increased junction forces with horizontal earthquake loads lead to tensile cracks in masonry walls, especially at joints where tensile bonds are very weak.

In this study, different types of damages were determined due to reasons such as insufficient girder applications, use of different materials, low quality bond material, insufficient binding in corner and non-reinforced concrete slab in the masonry structures in the rural areas of the region. The damages were mostly caused by the irregularities specified in the Turkey Building Earthquake Code -2018 (TBDY-2018).

Key Words

“Elazığ- Sivrice earthquake, masonry structures, damage assessment, out-of-plane behavior, in-plane behavior”

1. Giriş

Türkiye'nin ilk resmi deprem bölgeleri haritası Türkiye'yi, üç bölgeye ayıran "1945-Yersarsıntısı Bölgeleri Haritası"dır. Bu harita, zaman içinde bilimsel ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak en sonuncusu 2018'de olmak üzere birçok kez güncellenmiştir (Özmen, 2012).

Türkiye, Kuzey Anadolu Fay Sistemi (KAFS) ve Doğu Anadolu Fay Sistemi (DAFS) gibi çok önemli ve aktif faylar üzerinde yer almaktadır. KAFS'nde meydana gelen 1939 ve 1992 Erzincan, 1999 Kocaeli ve Düzce Depremleri, DAFS üzerinde oluşan 1998 Adana-Ceyhan, 2003 Bingöl, 2010 Elazığ-Kovancılar ve 2011 Van Depremleri bu fayların etkinliklerini göstermektedir (Yön ve Onat, 2017).

Şubat 2004 Çelikhan (Adıyaman), Ağustos 2004 Sivrice-Elazığ, Haziran 2005 Karlıova, Ocak 2007 Karakoçan-Elazığ, Şubat 2007 Sivrice-Elazığ, Ağustos 2007 Karlıova (Bingöl), Temmuz 2012 Andırın, Eylül 2012 Pazarcık – Kahramanmaraş, Kasım 2012 Çöçelli (Pazarcık-K.Maraş) ve Nisan 2019 Sivrice depremleri, son 15 yıldır Doğu Anadolu Fay Zonunun özellikle Gölbaşı-Türkoğlu ve Palu KD'sundaki Gökdere yükseliminin olduğu kesimde gerilmenin arttığı ve bu kesimlerin bir hazırlık evresine girmiş olduğu düşündürmektedir (Demirtaş, 2019).

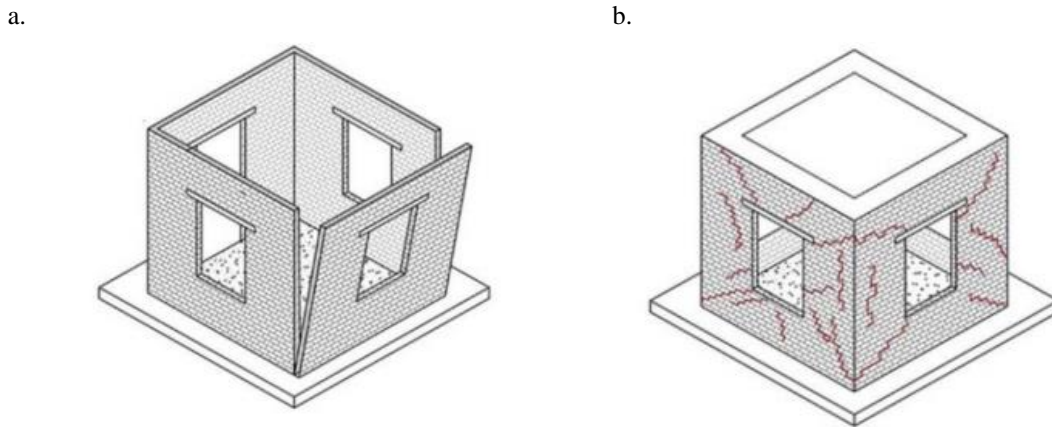
Yığma yapılar, taşıyıcı sistemi tuğla ve doğal taşlar gibi farklı kargir malzemelerden yapılmış düşey duvarlardan oluşan yapılardır. Türkiye'de, yığma yapılar özellikle kırsal bölgelerde yaygın olarak karşımıza çıkmaktadır. Deprem gibi yanal kuvvetlere karşı betonarme ya da çelik elemanlara göre istenen süneklik özelliğini sağlayamayan yığma yapılar; bu özelliğinden dolayı depreme dayanıklı yapı olarak değerlendirilmemektedir (Göker ve Karaşin, 2015; Akgül ve Doğan, 2020).

2. Materyal ve Method

Bu çalışma; 4 Nisan 2019 tarihinde DAF'nda merkez üssü Elazığ-Sivrice olan depremin en fazla hasara yol açtığı köylerden Doğanbağı köyünde yapılan saha çalışmalarına bağlı yerinde hasar tespiti ve değerlendirmelerini içermektedir. Çalışma çok sayıda literatür kaynaklı saha çalışmalarından elde edilen verilerin yanı sıra, yazar ekibi tarafından Elazığ-Sivrice depremi sonrası yapılan saha çalışmalarına bağlı değerlendirmeleri sunmaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Betonarme ve çelik yapılara nazaran sünek davranış göstermeyen yığma yapılarda meydana gelen deprem hasarlarının nedenleri; düzlem dışı davranış, düzlem içi davranış ve bu iki davranışın birlikte gözlemlendiği durumlar olarak üç ana grupta incelenmektedir (Şekil 1). Düzlem içi davranış taşıyıcı yığma duvara paralel doğrultuda etki eden düzlem kuvvetlerine bağlı iken düzlem dışı davranış taşıyıcı yığma duvarlara dik doğrultuda etkili olan sismik hareket sonucunda meydana gelmektedir (Oyguç, 2017; Oyguç ve Oyguç, 2017).



Şekil 1. (a) Düzlem dışı davranış; dik duvarların ayrılması;
(b) Düzlem içi davranış; deprem yönünde X çatlağı oluşumu. (Oyguç, 2017)

Meydana gelen ve yıkıcı etkisi olan birçok deprem sonrası yığma binalar üzerine yapılmış çok sayıda çalışma söz konusudur. Deprem sonrası gözlenen yapısal davranış ve oluşan hasarlara ilişkin lokal saha çalışmalarda; yapısal eksiklikler, duvar türleri ve birleşim şekilleri, binanın zemin/döşeme bütüncül davranışı, sismik hareket yönü, yönetmelik ihlalleri, kırsal bölgelerdeki muhtemel şiddet cetveli, güçlendirme tür ve önerileri gibi parametreler esas alınarak değerlendirmeler sunulmuştur (Yön ve Onat 2017; Göker ve Karaşin, 2015; Oyguç, 2017; Koç, 2016; Sayın vd., 2014; Tomazevič, 2000; D'Ayala ve Speranza, 2003; Jagadish vd., 2003; Jitendra ve Hiçyılmaz, 2008; Öztürk, 2018; Keskin ve Bozdoğan, 2018; Akgül ve Doğan, 2019, Öztürk, 2003; Güney vd., 2015; Doğan vd., 2006; Bayraktar vd., 2007).

Deprem sonrası hasar gören yığma yapılar üzerinde yapılmış çalışmalar, yapısal hasarların başlıca nedenlerini aşağıdaki gibi sıralamaktadır.

- Düşey veya duvar üstü hatılların eksik ya da yetersiz olması,
- Büyük kapı ve pencere boşluklarının bulunması,
- Duvar-köşe birleşimlerinde uygun olmayan bağlantılar,
- Şartnamelerde belirtilen kuralların ihlali,
- Mühendislik bilgisi/hizmetlerinin eksikliği,
- Kalitesiz işçilik,
- Düşük dayanımlı malzeme kullanımı,
- Boşluk oranı fazla tuğla kullanımı,
- Temel veya zemine bağlı oturmalar,
- Ağır çatılar,
- Düşüm noktalarının yanlış teşkil edilmesi,
- Saha koşullarına bağlı sismik performans,
- Her iki yönde taşıyıcı duvar yerleşiminin uygun olmaması,
- Döşemenin betonarme olmaması ve rijit diyafram oluşmaması.

Bu çalışma kapsamında, yukarıda verilen parametrelere bağlı olarak Elazığ-Sivrice yerleşkesinde bulunan 22 meskende gözlemsel saha çalışmaları ve değerlendirmeler yapılmıştır.

3.1. Elazığ – Sivrice Depremi Özellikleri

3.1.1. Yer hareketinin karakteristik özelliği

04.04.2019 tarihinde, Türkiye saati ile 20:31'de merkez üssü Sivrice (Elazığ) olan Mw 5.2 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Yerin 9.40 km derininde meydana gelen bu depremin en yakın yerleşim birimi Elazığ-Sivrice-Kılıçkaya köyüne uzaklığı 3.12 km'dir (Tablo 1). Merkez üssüne en yakın 5 farklı il merkezine olan uzaklıkları Tablo 2'de yer almaktadır. Ana şok sonrası kaydedilen 5 artçı deprem 1.8 ile 3.3 arasında değişen büyüklüklere sahiptir (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2019).

Tablo 1. Depremin merkez üssüne en yakın Türkiye'deki yerleşim yerleri

İl	İlçe	Köy	Mesafe (km)
Elazığ	Sivrice	Kılıçkaya	3.12
Elazığ	Sivrice	Kalaba	3.21
Elazığ	Sivrice	Akseki	3.28
Elazığ	Sivrice	Uslu	3.48
Elazığ	Sivrice	Kamışlık	4.44

Tablo 2. Depremin merkez üssüne en yakın Türkiye'deki il merkezleri

İl	İlçe	Mesafe (km)
Elazığ	Merkez	32.15
Malatya	Merkez	70.97
Tunceli	Merkez	87.22
Adıyaman	Merkez	102.25
Diyarbakır	Merkez	109.23

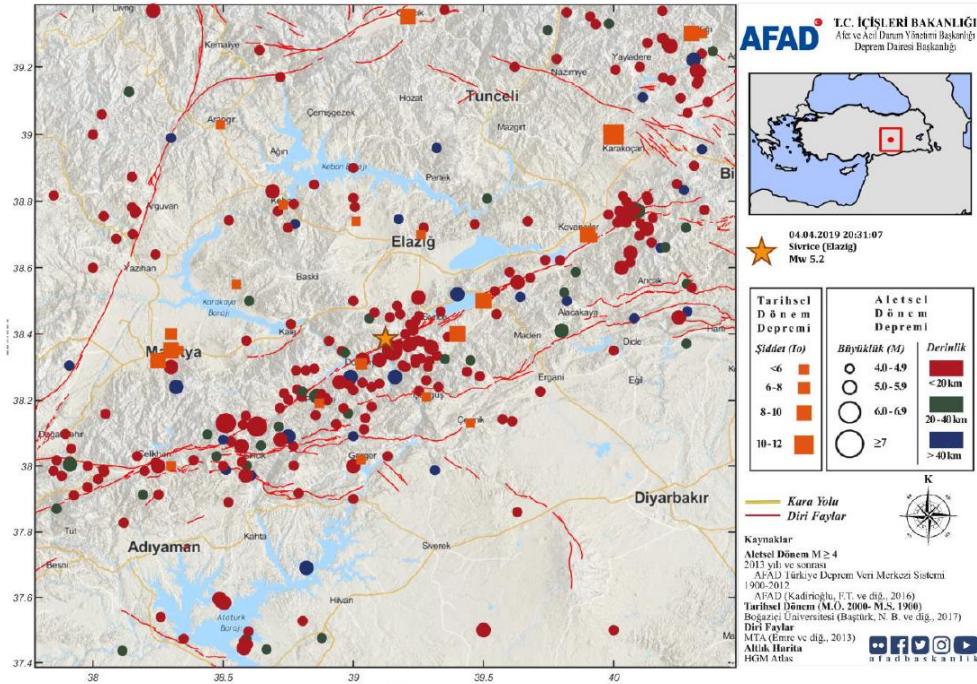
Deprem sol yanal doğrultu atımlı bir fay olan Doğu Anadolu Fayının Hazar Gölü-Sincik Segmenti üzerinde meydana gelmiştir. Bölgenin geçmiş dönem deprem aktivitesine göre bu segment üzerindeki son hasar yapıcı deprem, 144 yıl önce 1875 yılında meydana gelen M=7.0 büyüklüğündeki deprem olarak bilinmektedir. Söz konusu segment üzerinde büyük bir deprem olma olasılığı düşük-çok düşük olarak öngörülmektedir. Ancak 2004 yılından bu yana bölgede meydana gelen ve büyüklükleri $4.7 < M < 5.7$ arasında değişen 10 deprem nedeniyle son 15 yıldır Doğu Anadolu Fay Zonunun özellikle Gölbaşı-Türkoğlu ve Palu KD'sundaki Gökdere yükseliminin olduğu kesimlerde gerilmenin artmış olabileceği ve bu kesimlerin bir hazırlık evresine girmiş olabileceği düşünülmektedir. Hazar-Sincik Segmenti; yaklaşık 85 km uzunluktaki bu segmenttir ve Hazar Gölü ile Sincik arasında uzanır; kuzeydeki segment Hazar Gölü-Doğanyol arasında yer alır (Şekil 2), K60D doğrultuludur, güneydeki segment Doğanyol-Sincik arasında uzanır ve K55D doğrultusuna sahiptir (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2019; Demirtaş, 2019).



Şekil 2. Hazar-Sincik Segmenti (Demirtaş, 2019)

3.1.2. Bölgenin geçmiş dönem deprem aktivitesi

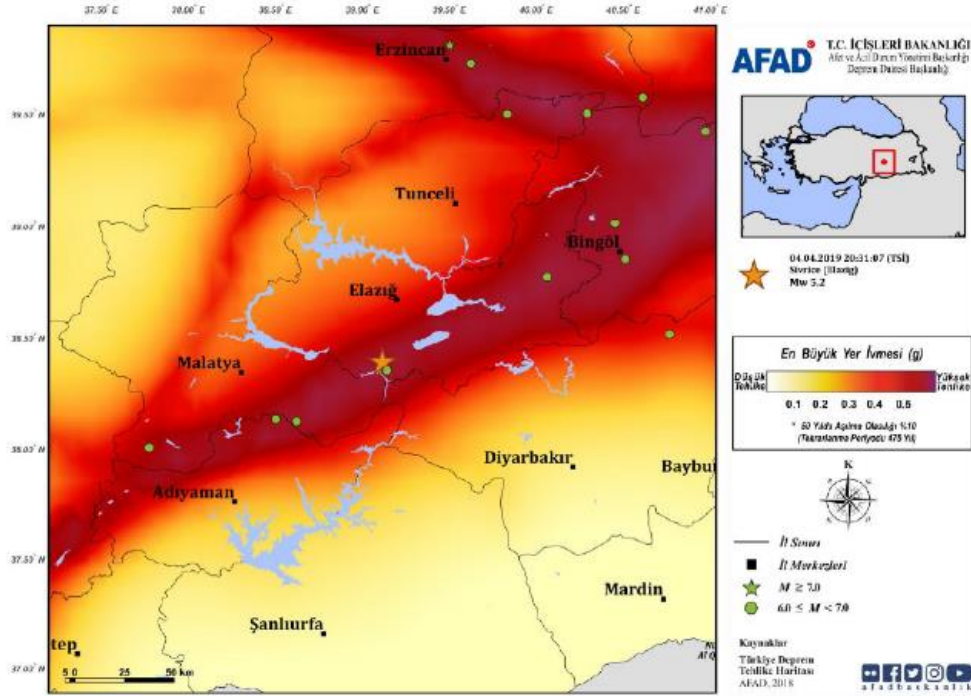
Bölgede 1900 yılından günümüze kadar en büyüğü 6,8 olmak üzere 282 adet $M \geq 4,0$ deprem meydana gelmiştir. Ayrıca bölgeye ait, 1900 yılı öncesi için, 41 adet tarihsel dönem depremi kaydı mevcuttur (Şekil 3) (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2019).



Şekil 3. Bölgenin tarihsel ve aletsel dönem deprem aktivitesi

3.1.3. Bölgenin deprem tehlikesi

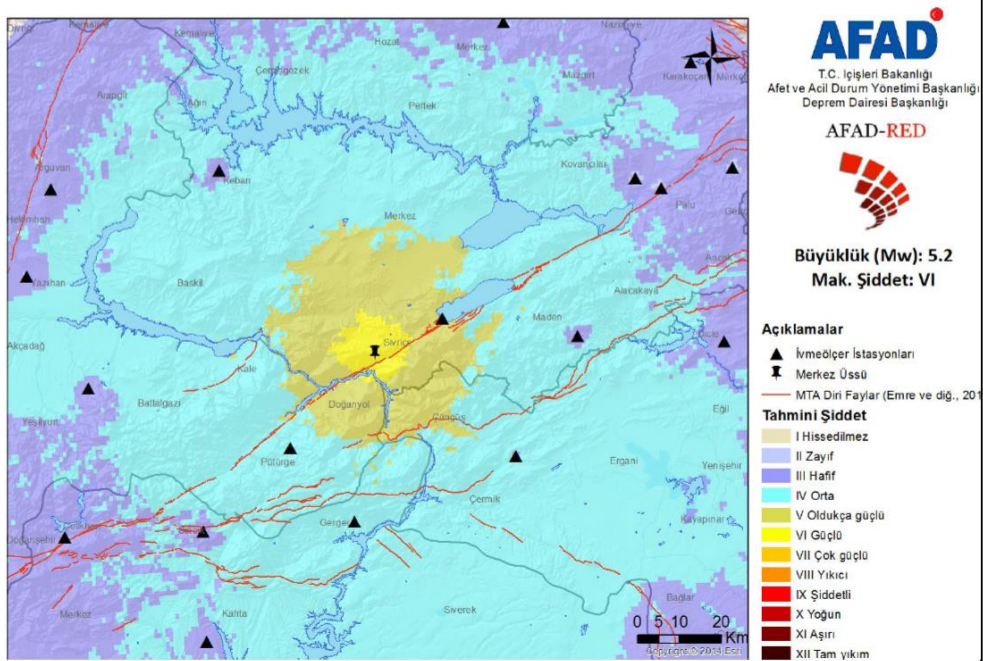
Depremın meydana geldiği noktanın Türkiye Deprem Tehlike Haritasındaki PGA 475 değeri 0.61881 g'dir. AFAD verilerine göre; bölgenin deprem tehlikesi Şekil 4' de görüldüğü gibidir (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2019).



Şekil 4. Türkiye Deprem Tehlike Haritasına göre bölgenin deprem tehlikesi

3.1.4. Deprem şiddeti

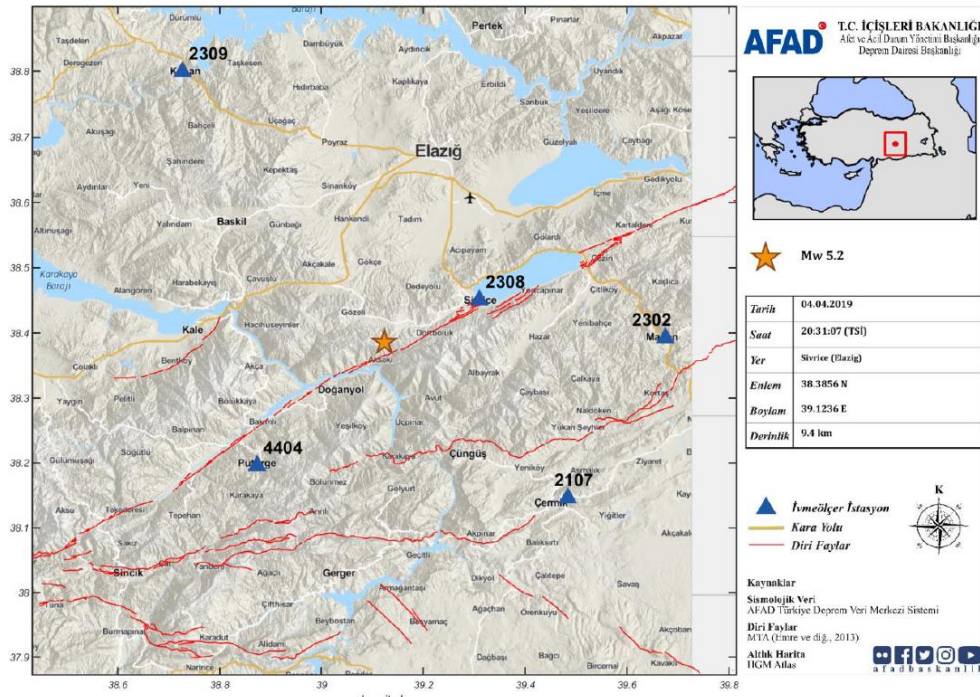
Deprem Ön Hasar Tahmin Sistemi (AFAD-RED) kullanılarak üretilen şiddet haritasına göre depremin merkez üssüne en yakın, Türkiye sınırları içerisindeki, yerleşim yerinde depremin şiddeti MMI VI olarak hesaplanmıştır (Şekil 5) (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2019).



Şekil 5. AFAD-RED tahmini şiddet haritası

3.1.5. Ölçülen ivme değerleri

112 adet ivmeölçer ile yapılan ön değerlendirme sonuçlarına göre en büyük ivme 38.41 gal olarak ölçülmüştür. Depremin merkez üssüne en yakın 5 ivmeölçer istasyonunun ölçtüğü ivme değerleri Şekil 6' de, istasyonlara ait bilgiler ise Tablo 3' de verilmiştir (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2019).



Şekil 6. Depremi kaydeden en yakın 5 ivmeölçer istasyonunun dağılımı

Tablo 3. Bölgedeki ivmeölçer istasyonları ve ölçülen ivme değerleri

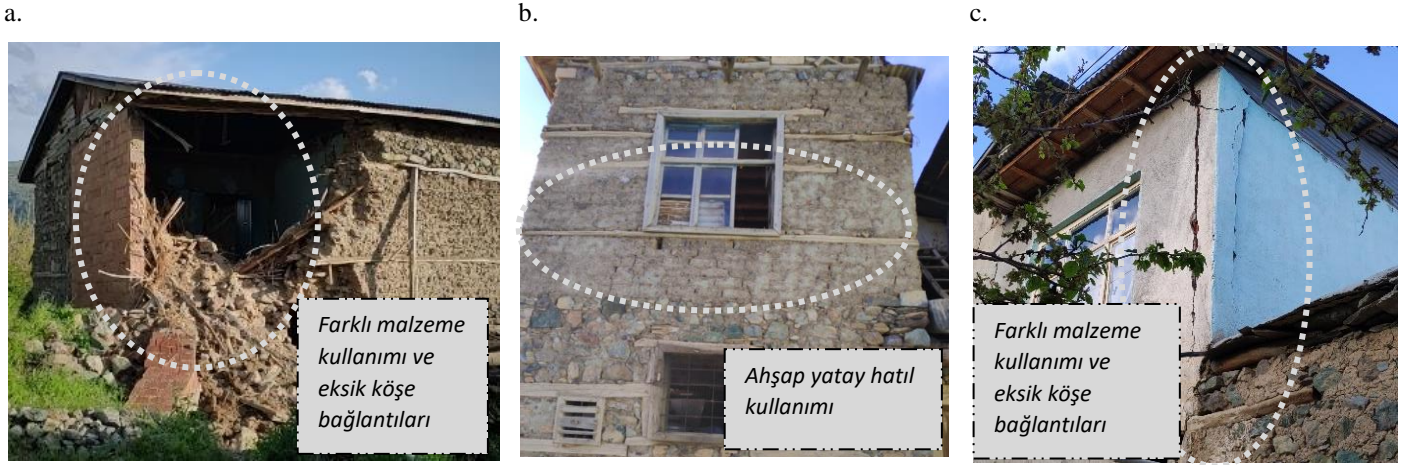
Kodu	İstasyon		Ölçülen İvme Değerleri (gal)			Uzaklık R_{epi} (km)
	Enlem	Boylam	K-G	D-B	Düşey	
2308	38.4506	39.3102	38.3102	29.300	16.150	17.0
2107	38.1459	39.4938	4.877	4.273	2.077	30.15
4404	38.1959	38.8738	13.649	10.765	8.692	33.60
2302	38.3923	39.6754	1.428	1.222	1.407	40.21
2309	38.7991	38.7273	9.221	5.710	2.744	68.22

3.2. Yapısal Hasarlar

3.2.1. Malzeme özelliklerine bağlı yapısal hasarlar

Depremi yaşadığı bölgedeki yığma binalar; düşük malzeme kalitesine sahip ve bölgeden temin edilen moloz taşların bağlayıcılık özelliği zayıf malzemeler ile örülmesi ve yatay hatlı olarak genellikle ahşap malzeme kullanımı esasına dayanır. Ayrıca kerpiçten yapılmış yığma binaların duvarları yer yer sonradan eklenen tuğla duvar eklentilere sahiptir. Yığma binalarda taşıyıcı duvarlar, düzensiz ve gelişigüzel yerleştirilmiş kerpiç, moloz taş, tuğla gibi malzemeler düşük bağlayıcılık özelliği olan çamur harcı veya yer yer çimento katkılı kireç ile örülmüştür. Farklı rijitliğe ve malzeme özelliğine sahip duvarlarda; düzlem içi, düzlem dışı ve zayıf köşe bağlantılara bağlı hasar ve göçmeler söz konusudur (Şekil 7).

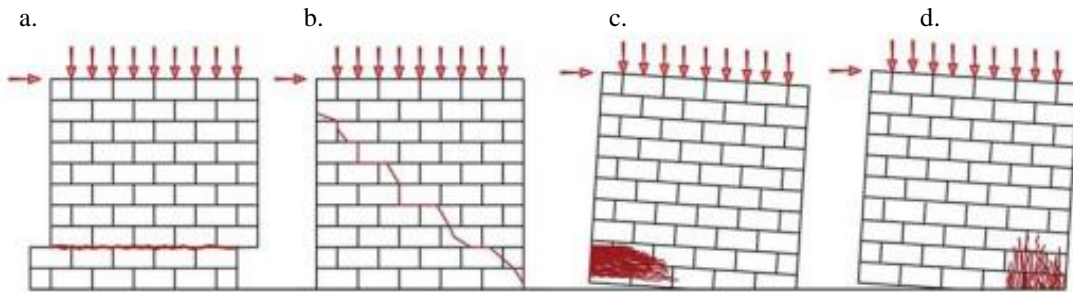
Kargir malzemelerin düşük kaliteli, farklı mekanik ve boyutsal özelliklere sahip olması; yığma binalarda devrilme ve göçme riskini arttıracak niteliktedir. 2018 TBDY’nde yığma binalarda taşıyıcı duvar malzemesi olarak; boşluklu beton briketler, dolgu duvarlar imalatında kullanılan yatay delikli tuğlalar, kerpiç, moloz taş, pomza taşı ve benzeri biçim verilmiş blokların taşıyıcı yığma duvarlarda kargir malzeme olarak kullanımı yasaklanmıştır (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018). Saha çalışmalarından elde edilen verilere göre; 2018 TBDY’nde yasaklanan kerpiç malzemenin kullanımı bölgede birçok tahribat ve göçmelerde önemli bir etkidir.



Şekil 7. Malzeme Özelliklerine Bağlı Yapısal Hasarlar

3.2.2. Düzlem içi davranışa bağlı yapısal hasarlar

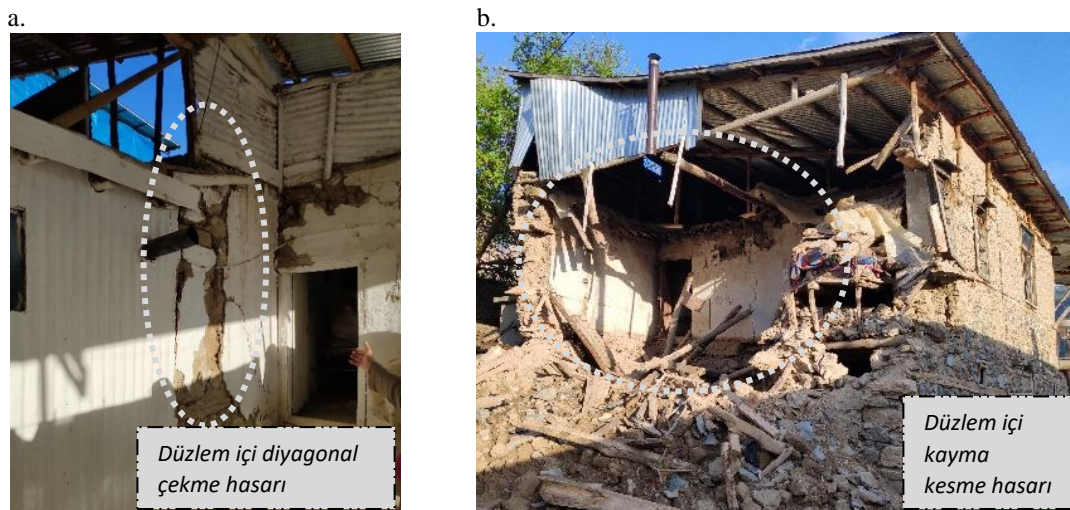
Düzlem içi davranışlar; sismik yüke maruz kalan bir yığma duvardaki tipik göçme modları farklı şekillerde hasar ile sonuçlanmaktadır (Şekil 8). Aşırı eğilme ya da kesme kuvveti söz konusu hasara yol açmaktadır. Düzlem içi davranışa etki eden yük kombinasyonu, duvar geometrisine, malzeme bileşenine ve yüklemenin doğasına (monotonik veya çevrimsel) bağlıdır (Oyguç, 2017; Zhuge vd., 1998).



Şekil 8. Düzlem içi sismik yüke maruz kalan bir yığma duvardaki tipik göçme modları:
(a) Kayma kesme hasarı (b) Diyagonal çekme hasarı (c) Devrilme (d) Tabanda ezilme (Oyguç, 2017)

Düzlem içi davranış kayma kesmesi, diyagonal kesme ve eğilme hasarları olarak üç ana gruba ayrılmaktadır. Eğilme hasarları ise mafsallaşma ve duvar tabanının ezilmesi olarak iki alt gruba ayrılırlar. Bunlara ilaveten, söz konusu mekanizmalar yükseklik/genişlik oranına ve yığma yapı malzemesinin kalitesine bağlıdır (Oyguç, 2017; Tomazevič, 2000; D'Ayala ve Speranza, 2003).

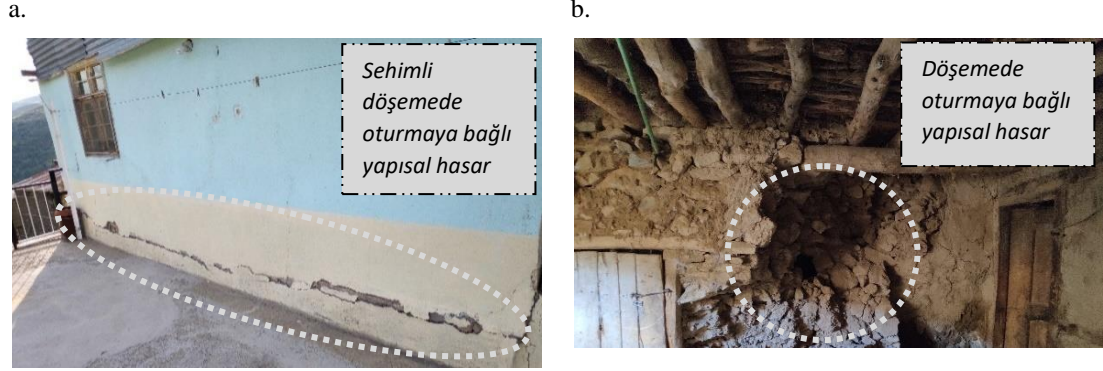
Bölgede taşıyıcı yığma duvar doğrultusunda etkili olan düzlem kuvvetlerine bağlı olarak düzlem içi davranış, göçme ve hasara sebep olmuştur (Şekil 9).



Şekil 9. Düzlem İçi Davranışa Bağlı Hasarlar

3.2.3. Düzlem dışı davranışa bağlı yapısal hasarlar

Saha gözlem sonuçlarından da elde edilen verilere göre; taşıyıcı yığma duvarlara dik doğrultuda etkili olan sismik hareket sonucu düzlem dışı davranışlar, mertekler ile üstten tutulmamış taşıyıcı yığma duvarlarda derin çatlak ve yarıklara sebep olmaktadır (Şekil 10). Şekil 10.a. da betonarme döşemeye oturan duvarda döşemenin deprem etkisiyle sehim yapması sonucu oluşan hasarlar söz konusudur.

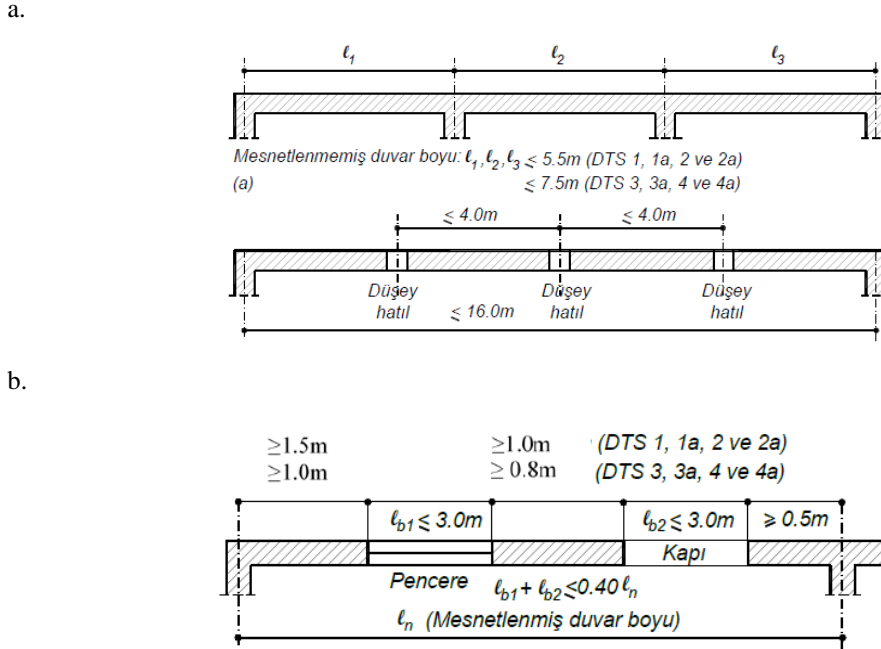


Şekil 10. Düzlem Dışı Davranışa Bağlı Hasarlar

3.2.3. Boyutsal özellikleri uygun olmayan elemanlara bağlı yapısal hasarlar

2018 TBDY'de donatısız ve kuşatılmış yığma binalarda taşıyıcı yığma duvarlarda desteklenmemiş mesafeler ve düşey hatıllar arası olması gereken mesafeler Şekil 11'de verildiği gibi sınırlandırılmıştır (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018).

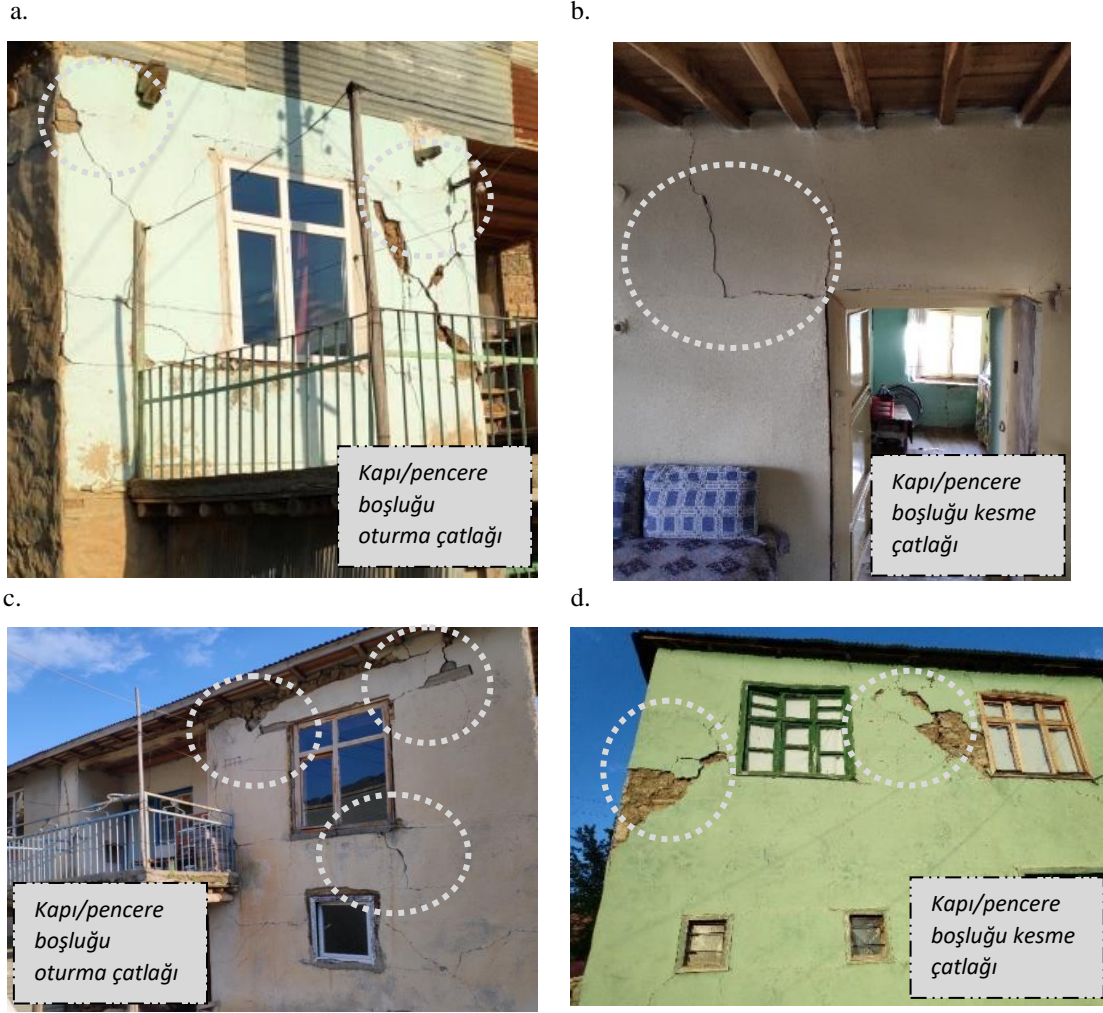
Gözlemlenen saha çalışmalarında; desteksiz yapılan uzun duvarlarda, uygun olmayan kapı pencere boşluğu, konstrüktif kurallara uymayan hatalı yerleşim düzeninden ve eksik düşey/yatay hatil kullanımından kaynaklı hasarlar tespit edilmiştir (Şekil 10.a ve Şekil 16).



Şekil 11. Yığma binalarda taşıyıcı yığma duvarlarda desteklenmemiş sınır değerler (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018)

3.2.4. Kapı Pencere boşluğuna bağlı oluşan yapısal hasarlar

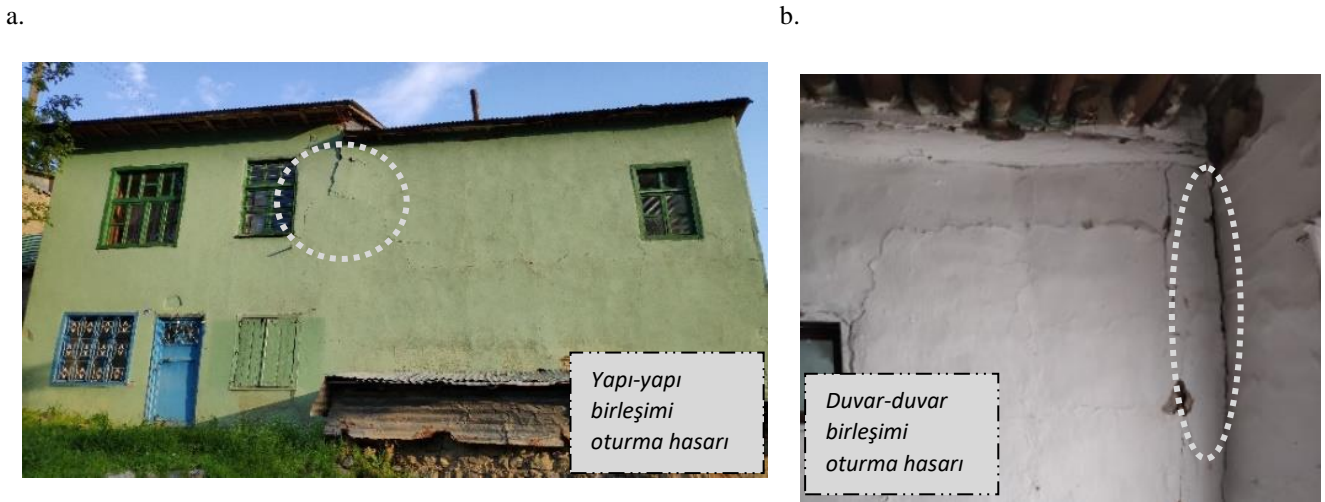
Kapı ve pencerelerin duvar köşelerine yakınlığı ya/ya da kapı pencere boşluklarının fazla olması kesme çatlaklarına sebep olurken; yapının oturduğu zemindeki farklı zemin oturmaları ve kapı pencere boşluklarının fazlalığı oturma çatlaklarına sebep olmaktadır (Şekil 12).



Şekil 12. Kapı Pencere Çevresinde Oluşan Hasarlar

3.2.5 Farklı zemin oturmalarına bağlı yapısal hasarlar

Yapılan saha çalışmalarında; farklı zemin oturmalarına bağlı olarak yığma yapılarda oturma çatlakları gözlemlenmiştir. Bölgenin bazı yerleşim alanlarının yamaca oturması; iki yapının birleşim yerlerinde ya da yapı içi duvar birleşim bölgelerinde hasarlara sebep olmuştur (Şekil 13, Şekil 7c, Şekil 12a, Şekil 12c). Şekil 13.c. de; döşemesi betonarme olan duvarda zemin oturmasına bağlı yatay ayrılma çatlakları söz konudur.



Şekil 13. Farklı Zemin Oturmalarına Bağlı Hasarlar

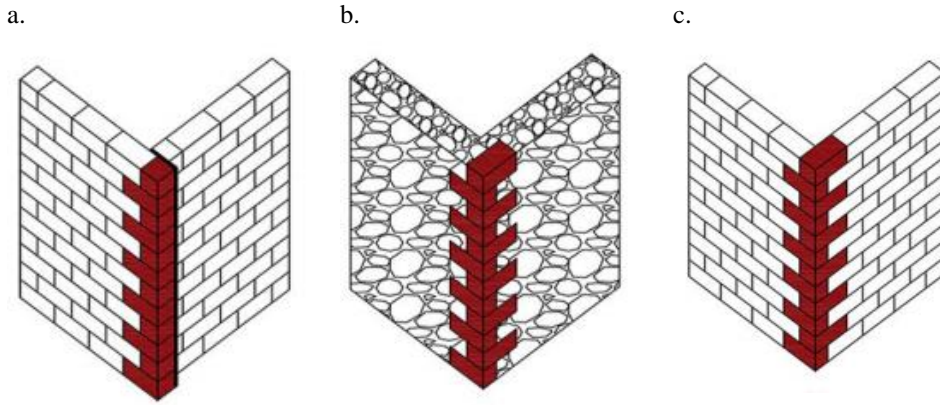
c.



Şekil 13 (devam). Farklı Zemin Oturmalarına Bağlı Hasarlar

3.2.6. Yeterli bütünlük sağlamayan duvar-duvar, duvar-döşeme, çatı-duvar birleşimlerine bağlı oluşan yapısal hasarlar

Yığma yapılarda köşe birleşim bölgelerinde yeterli bütünlüğün sağlanmaması büyük hasarlara sebep olmaktadır (Ural vd., 2012; Inel vd., 2013). Bölgedeki hasarlı yapılar üzerinde incelenen köşe detayları; kilit taşı eksikliği, yetersiz kilitlenme ve doğru birleşim özellikleri Şekil 14’te verilmiştir (Oyguç, 2017; D’Ayala ve Speranza, 2003).



Şekil 14. Köşe detayları: (a) Kilit taşı eksikliği (b) Yetersiz kilitlenme (c) Yeterli birleşim (Oyguç, 2017)

İncelenen hasarlı yapılarda, duvar-duvar veya duvar-döşeme bağlantılarında yapım esaslarına uyulmaması ve desteksiz çatı sisteminden kaynaklanan deprem etkisine bağlı göçmeler söz konusudur. Ayrıca saha çalışmalarında; Şekil 15’de kaydedildiği gibi köşe birleşimi hasarlarına sıklıkla rastlanmıştır. Duvar-duvar köşe birleşimlerinin yetersiz ve yanlış mesnetlenmeleri yapının bölgesel olarak düşük stabil özellik göstermesine sebep olmaktadır. Aynı yapıda yetersiz çatı-duvar birleşimi ve duvar üstü hatlı eksikliği; duvarlarda genellikle hasar görmeden düzlem dışı devrilmelere sebep olmuştur.

a.



b.



Şekil 15. Yeterli Bütünlük Sağlamayan Eleman Birleşimine Bağlı Oluşan Hasarlar

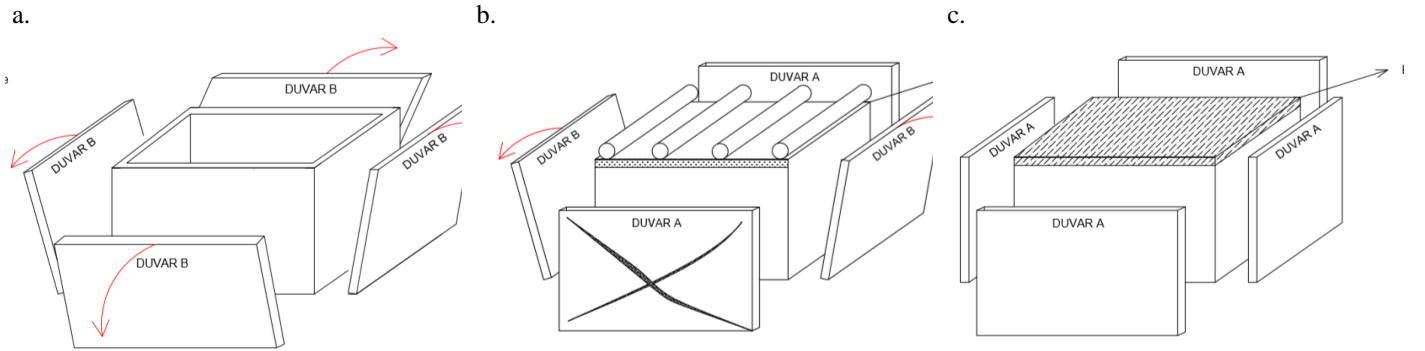
Bölgedeki tespitler sonucunda döşemesi betonarme olmayan ya da merteksiz yığma binalarda daha büyük hasarlar tespit edilmiştir. Ayrıca duvarlara basan merteklerin altına yatay hatlı konmaması; merteklerin bastığı duvarlarda yukarıdan aşağıya çekme çatlaklarına sebep olurken, merteklerin basmadığı duvarlarla onlara dik olan merteklerin bastığı duvarların birleşim hattında yukarıdan aşağı açılmalarına sebep olmuştur (Şekil 13.b., Şekil 15.a. ve Şekil 16).



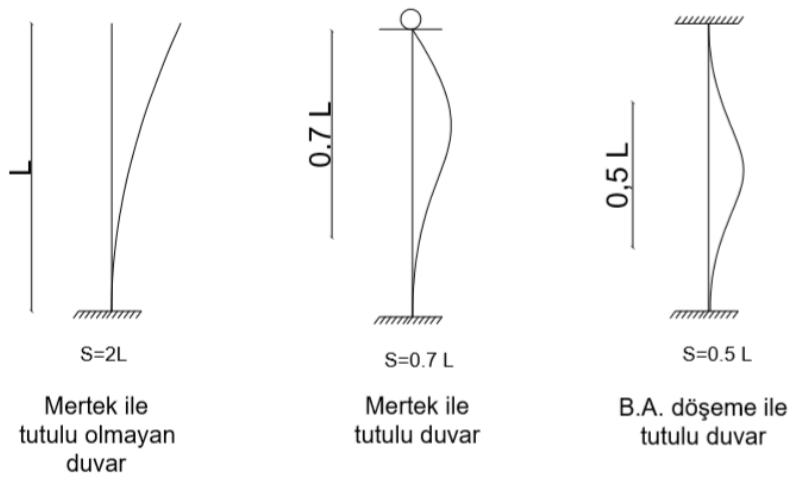
Şekil 16. Çatı ve Duvarlar Arasında Yetersiz Bağlantıya Bağlı Hasarlar

Mertek veya betonarme döşemenin duvar stabilitesine etkisi

Şekil 17'de a. döşemesiz, b. mertekli, c. betonarme döşemeli yığma duvarların döşeme bağlantı türüne bağlı düzlem içi/dışı göçme modelleri verilmiştir. Döşeme mertegi ile tutulu olan yığma duvarlar düzlem dışı devrilmeye karşı mertek ile tutulu olmayan duvarlara nazaran daha stabil davranış sergilerken, en stabil davranış betonarme döşemeyle tutulu duvarlardan beklenmektedir (Şekil 18).



Şekil 17. Yığma duvarlarda döşeme türüne bağlı düzlem içi/dışı göçme modelleri
(a) Döşemesiz (b) Mertekli (c) BA. döşemeli



Şekil 18. Yığma duvarların düzlem dışı davranış modeli

4. Sonuç

4 Nisan 2019 tarihinde Doğu Anadolu Fay hattı üzerinde, Elazığ-Sivrice depremi orta büyüklükte sığ bir depremdir. Söz konusu yığma binalarda yapılan incelemeler; Mw 5.2 büyüklüğündeki orta büyüklükteki depremin yapısal hasarın oluşmasına sebep olduğu ve bu yapıların yetersiz deprem performansın sergilediği yönündedir.

Türkiye'nin çoğu kırsal bölgesinde olduğu gibi Elazığ-Sivrice depreminin etkili olduğu bölgede; mevcut yığma binalar kerpiç, tuğla, yontma taşlar ile kötü bağlayıcı malzeme kullanılarak inşa edilmektedir. Depremin meydana geldiği bölgede kullanılan malzeme; bölgeye özgü ve ekonomiktir ancak, imkanlar dahilinde yapılan yığma binalarda meydana gelen hasarlar yıkıcı etkilere sahiptir. 2019 Elazığ-Sivrice depremi geçmiş depremlerde gözlemlenen ve raporlanan kerpiç malzemenin kullanımının uygun olmadığını bir kez daha sergiler niteliktedir.

Yapılan tespitler sonucunda depremde hasar gören yığma binaların inşasında eksik mühendislik hizmetleri ve kapı, pencere boşluklarının fazla olmasına bağlı olarak, özellikle kerpiç malzemeli taşıyıcı duvarlarda kesme çatlaklarına sebep olmuştur. Düzlem içi ve düzlem dışı davranışa bağlı olarak yığma duvarlardaki hasar ve göçmeler farklı zemin oturmalarına bağlı olarak hasarın boyutlarını arttıracak niteliktedir. 2018 TBDY ve daha öncesindeki yürürlükte bulunan uygulama esaslarının yeterince ya da hiç tatbik edilmemiş olması, bölgede devam etmesi muhtemel olan deprem vakalarına yıkıcı özellik kazandırmaktadır.

Her bir derece deprem büyümesinin depremin şiddetini yani yıkım oranını 32 kat büyütmektedir (Ocak, 2019). Bölgenin depremselliği dikkate alındığında 5.2 büyüklüğündeki bir deprem beklenen nihai bir deprem olmadığından bölge için beklenen 7'nin üzerinde bir depremin olması durumunda, 2 derecelik büyümenin şu an hasar görmemiş ancak azda olsa benzer hataları içeren diğer binalar içinde büyük hasarlar getirecektir.

Yaklaşık 45 haneli Doğanbağı köyünde gözlemlenen hasarlı mesken sayısı 22 olarak tespit edilmiş, bu hasarlar detaylı olarak incelendiğinde, daha önceki çalışmalarla da ortaya konmuş yaklaşık 14 adet kusurun büyük oranda var olduğu görülmüştür. Bunlardan en çok dikkat çeken parametreler önem sırasına göre; proje eksikliği ve şartnamelere uyulmaması, efsafsız ve bölgeye özgü malzemelerin kullanımı ve kalitesiz işçiliktir.

Bölgede yer alan mevcut hasar görmemiş yapı stoğunun gerekli röleve çalışmaları yapılarak, uygun duvarlarına şartnamelere uygun ve simetrik olarak, tuğla veya betonarme ilave duvarlar ve rijit diyafram oluşturularak duvarların bütüncül hareketini sağlayacak betonarme döşemeler eklenerek güçlendirilmesi gerekmektedir.

Referanslar

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2019). 04 Nisan 2019 Sivrice (Elazığ) Mw 5.2 Depremine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu. Deprem Dairesi Başkanlığı. Ankara.

Akgül, M. ve Doğan, O. (2019). Yığma yapılarda güçlendirme yöntemleri ve TBDY – 2018'de yığma yapılar. Munzur 1. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi, Tunceli, Türkiye, 24-26 Mayıs 2019, sayfa: 73-86.

Akgül, M. ve Doğan, O. (2020). Altındağ/Ankara Özelinde Tipik Yığma Binaların Deprem Risklerinin 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre İncelenmesi. Engineering Sciences (NWSAENS), doi: 10.12739/NWSA.2020.15.1.1A0446

Bayraktar, A., Çoşkun, N., Yalçın A. (2007). Performance of Masonry Stone Buildings during the March 25 and 28 2004 Aşkale (Erzurum) Earthquake in Turkey. Journal of performance of constructed facilities. doi:10.1061/(ASCE)0887-3828(2007)21:6(432).

D'Ayala, .D. ve Speranza, E. (2003). Definition of collapse mechanisms and seismic vulnerability of historic masonry buildings. Earthquake Spectra, sayı 19-3, sayfa: 479-509.

Demirtaş, R. (2019). 04 Nisan 2019 Sivrice (Elazığ) depremi (Mw 5.2) ve Doğu Anadolu Fay Sistemi'nin gelecek deprem potansiyeli. Teknik Rapor. Technical Report. DOI: 10.13140/RG.2.2.35050.57281 Erişim: https://www.researchgate.net/publication/332223789_04_Nisan_2019_Sivrice_Elazig_Depremi_Mw_52_ve_Dogu_Anadolu_Fay_Sistemi'nin_Gelecek_Deprem_Potansiyeli. (Erişim Tarihi: Eylül 2019).

Doğan, O., Koçak, A. ve Çağlar, Y., (2006). Fay hatlarına yakın bölgelerde yapı tasarımı. Yapısal onarım ve güçlendirme sempozyumu, Denizli, Türkiye, 2006, sayfa:71-75.

Güney, D., Aydın, E. ve Oztürk, B. (2015). The evaluation of damage mechanism of unreinforced masonry buildings after Van(2011) and Elazig (2010) Earthquakes. 11th International Conference on Damage Assessment of Structures (DAMAS 2015), Ghent, Belgium.

Göker, Ş. ve Karaşin, A. (2015). Depremde hasar gören kırsal yapılar için bir yapısal hasar değerlendirilmesi. DÜMF Mühendislik Dergisi, cilt 6, sayı 1, sayfa: 31-38.

- Inel, M., Ozmen, H.B., Akyol, E. (2013). Observations on the building damages after 19 May 2011 Simav (Turkey) earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*. doi: 10.1007/s10518-012-9414-3.
- Jagadish, K. S., Raghunath, S. ve Nanjunda Rao, K.S. (2003). Behaviour of masonry structures during the Bhuj earthquake of January 2001. *Journal of Earth System Science*, sayı 112-3, sayfa: 431-440.
- Jitendra, K. B. ve Hiçyılmaz, K. M. O. (2008). General Observations Of Building Behaviour During The 8th October 2005 Pakistan Earthquake. *Bulletin Of The New Zealand Society For Earthquake Engineering*, sayı 41 - 4.
- Keskin, E. ve Bozdoğan, K.B. (2018). 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Kırklareli İli özelinde değerlendirilmesi. *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, sayı 4-1, sayfa: 74-90.
- Koç, V. (2016). Depreme Maruz Kalmış Yığma ve Kırsal Yapı Davranışlarının İncelenerek Yığma Yapı Yapımında Dikkat Edilmesi Gereken Kuralların Derlenmesi. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, sayı 2016:2, sayfa: 36-57.
- Ocak, M. E. (2019). Richter Ölçeği Nedir? Erişim: <http://www.bilimenc.tubitak.gov.tr/makale/richter-olcegi-nedir>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019).
- Oyguc, R. ve Oyguc, E. (2017). 2011 Van earthquakes: Lessons from damaged masonry structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001057.
- Oyguç, R.A. (2017). 2011 Van depremlerinden sonra yığma yapılarda gözlemlenen hasarlar. *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, cilt 19(2), sayfa: 296-315. Doi: 10.25092/baunfbed.348482.
- Özmen, B. (2012). Türkiye deprem bölgeleri haritalarının tarihsel gelişimi. *Geological Bulletin of Turkey*, cilt 55, sayı 1.
- Öztürk, B. (2003). Seismic drift response of building structures in seismically active and near-fault regions. Ph.D. Thesis, Purdue University, Dept. of Civil Engineering, U.S.A.
- Öztürk, M. (2018). 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve Türkiye deprem Tehlike haritası ile ilgili iç Anadolu bölgesi bazında bir Değerlendirme. *Selçuk-Teknik Dergisi*, cilt 17, sayı:2.
- Sayın, E., Yön, B., Calayır, Y. ve Gör, M. (2014). Construction failures of masonry and adobe buildings during the 2011 Van earthquakes in Turkey. *Structural Engineering and Mechanics*, sayı 51(3), sayfa: 503-518.
- Tomazevič, M. (2000). Shaking table tests of small-scale models of masonry buildings: advantages and disadvantages. *Massivbau 2000: Forschung, Entwicklungen, Anwendungen*.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği TBDY-2018, Ankara.
- Ural, A., Doğan, A., Sezen, H., Angın Z. (2012). Seismic performance of masonry buildings during the 2007 Bala, Turkey earthquakes. *Natural Hazard*. doi: 10.1007/s11069-011-9887-4.
- Yön, B. ve Onat, O. (2017). 3 Aralık 2015 Bingöl-Kiğı depreminin Tunceli ilindeki yığma yapılara etkisinin değerlendirilmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*. cilt 9, sayı 1, sayfa: 375-385.
- Zhuge, Y., Thambiratnam, D. ve Corderoy, J. (1998). Nonlinear dynamic analysis of unreinforced masonry. *Journal of Structural Engineering*, cilt 124, sayı 3, sayfa: 270-277.



Yarasa Algoritması Kullanılarak Tek Makinalı Sonsuz Baralı Güç Sisteminin, Geleneksel ve PID Güç Sistem Dengeleyicisi (GSD) Parametrelerinin Belirlenmesi

Determination of Traditional and PID Power System Stabilizer (PSS) Parameters of Single Machine Infinite Bus Power System Using Bat Algorithm

Burak Temel¹ , İbrahim Eke¹ 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 71451, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 30/09/2019

Kabul / Accepted: 03/11/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Bu makale, tek-makinalı sonsuz-baralı (TMSB) bir güç sisteminin düşük frekanslı salınımlarını söndürmek için bir doğal metasezgisel optimizasyon algoritması olan yarasa algoritmasını kullanarak geleneksel Güç Sistemi Dengeleyicisi (PSS) ve PID tabanlı Güç Sistemi Dengeleyicisi (PID-PSS) parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmasını önerir. Güç Sistemi Dengeleyicisi parametrelerinin belirlenmesi, zaman bölgesi tabanlı amaç fonksiyonu ile bir optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. Bu problem; yarasa algoritması (YA) optimizasyonu ile belirlenen parametrelerin, Heffron-Phillips modeli temel alınarak oluşturulan tek-makinalı sonsuz-baralı (TMSB) güç sisteminin MATLAB/Simulink uygulaması üzerinde test edilerek rotor hız değişim ($\Delta\omega$) kararsızlığının sönmelenmesinde çözüm olarak kullanılmıştır. Yarasa algoritması optimizasyonu sonucu parametreleri belirlenen geleneksel Güç Sistemi Dengeleyicisinin (PSS) ve PID tabanlı Güç Sistemi Dengeleyicisi (PID-PSS) performans sonuçları karşılaştırılmıştır. Yarasa algoritması ile hesaplanmış geleneksel PSS'in ve PID-PSS'in rotor hız değişim ($\Delta\omega$) kararsızlığını sönmelendirdiği, fakat geleneksel PSS'in kararlılığının ve performansının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

"MATLAB, Simulink, Güç Sistemi Kararlılığı, Güç Sistemi Dengeleyicisi, Yarasa Algoritması, PSS, TMSB"

Abstract

This paper, recommends the determination of the traditional power system stabilizer (PSS) and PID based power system stabilizer (PID-PSS) parameters using the bat algorithm, which is a natural metaheuristic optimization algorithm to suppress the low frequency oscillations of a single-machine endless-busbar (SMIB) power system. The determination of the parameters of the power system stabilizer was converted to an optimization problem by the time domain based objective function. This problem; The parameters determined by bat algorithm (BA) optimization were tested on MATLAB / simulink application of single-machine infinite-busbar (SMIB) power system based on Heffron-Phillips model and used as a solution to dampen rotor speed change ($\Delta\omega$) instability. The results of the bat algorithm optimization were compared the performance results of the traditional power system stabilizer (PSS) and the PID based power system stabilizer (PID-PSS). The traditional PSS and PID-PSS, calculated by the bat algorithm, damped the rotor speed change ($\Delta\omega$) instability. But the stability and performance of the traditional PSS were observed to be better.

Key Words

"MATLAB, Simulink, Power System Stabilizer, BA , Bat Algorithm, PSS, SMIB"

1. Giriş

Günümüzde her geçen gün artan enerji ihtiyacı göz önüne alındığında, güç sistemlerinin daha verimli ve tasarruflu olarak kullanılması önem arz etmektedir. Bir güç sisteminin normal çalışması esnasında sistemden yük eksiltilmesi veya sisteme yeni yük eklenmesi, güç sisteminde düşük genlikli ve frekanslı (0.2 – 0.3 Hz) salınımların meydana gelmesine sebep olur. Meydana gelen bu düşük genlikli ve frekanslı salınımların çok uzun sürelerde devam etmesi, üretim noktasından tüketicilere güvenilir ve kaliteli bir enerji aktarmak için kullanılan Enterkonnekte sistemin güç iletimini sınırlayacak duruma gelmesine ve hatta sistemin iletiminin kesilmesine neden olabilir. Güç sisteminin normal çalışmasını etkileyen düşük genlikli ve frekanslı bozucu etkiler sonucu elektriksel ve mekanik güç dengesinin bozulması durumunda sistemin açısız kararlılığını koruyabilmesi için sisteme yeterli senkronizasyon momentinin verilmesi gereklidir. Gerilim regülatörünün oluşturduğu senkronizasyon momentinin katkısıyla salınımlar söndürülürken güç sisteminin senkron bir şekilde çalışması sağlanmış olur. Fakat büyük bir bozucu etkisine maruz kalan güç sisteminin salınımlarının söndürülmesi için senkronizasyon momentini yetersiz kalabilir. Bu yetersizlik durumunun giderilmesi, gerekli miktar sönüm momentinin üretilmesi ve sistemin daha stabil çalışmasını sağlayabilmek için senkron makineye güç sistem dengeleyicisi (Power System Stabilizer, PSS, GSD) eklenir. 1960'lı yıllardan itibaren senkronizasyon momentine ek olarak sönüm momenti sağlamak amacıyla güç sistem denetleyicileriyle, gerilim regülatörlerinin girişlerine ek bir işaret uygulamaktadırlar (Eke, 2011). Güç sistemlerinde oluşan salınımların söndürülmesi ve sürekli hal kararlılığının iyileştirilmesi için bir çok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır.

Larsen, E. V. and Swann D.A.; (1981), tarafından yapılan çalışmaların birincisinde basitleştirilmiş tek makineli sonsuz güçlü bara sistemini kullanmışlar ve GSD girişlerine hız, frekans ve güç parametreleri uygulayarak analizler yapmışlardır. GSD giriş sinyallerinin frekans cevap karakteristiklerini incelemişlerdir (Larsen&Swann, 1981).

Larsen, E. V. and Swann D.A.; (1981), tarafından yapılan ikinci çalışmada ise sürekli ve dinamik hal durumunun sınır değerlerinin belirlenmesi ve salınım tiplerine göre GSD'nin tepkisi incelenmiştir. Ayrıca birinci çalışma sonucunda elde ettikleri durumlara göre GSD parametre ayarlarının geleneksel yöntemler ile nasıl yapıldığı açıklanmıştır (Larsen&Swann, 1981).

Larsen, E. V. and Swann D.A.; (1981), tarafından yapılan son çalışmada ise uygulanan farklı sinyal girişleri ve küçük bozucu giriş etkilerinin analiz edilmesi ile GSD'nin tasarımına yönelik önemli bir katkı sağlamışlardır (Larsen&Swann, 1981).

Chi-Jui, W. and Yuan-Yih, H.:(1988), tarafından yapılan çalışmada kendi kendini ayarlayabilen PID (Proportional – Integral – Derivative) tabanlı GSD ile çok makineli güç sistemin sürekli hal kararlılığını sağlamak amacıyla geniş çalışma bölgesinde farklı sistem parametre değerlerinde çalışmalar yapmış ve değişken parametre değerlerine rağmen sistemin iyi sönümlenme karakteristiği gösterdiğini analiz etmiştir. Wu Chi-Jui ve Hsu Yuan-Yih bu çalışmaları ile çok makineli güç sistemlerinin GSD tasarımına farklı bir bakış açısı sağlamışlardır (Chi-Jui&Yuan-Yih, 1988).

Trudnowski, D.J., Smith, J.R.; (1991), tarafından düşük dereceli bir jeneratörü büyük bir sisteme bağlayarak oluşturulan modelinde GSD transfer fonksiyonunu elde etmede yeni bir metot önermişlerdir. Bu metot Prony sinyal analiz olarak tanınır. Yerel ve bölgeler arası elektromekanik salınımların analizini içerir. Benzetim çalışmaları için 16 jeneratöre bağlı 27 baralı bir test sistemi kullanılmıştır. Bölgeler arası salınımların GSD ile söndürülmesini sağlayan yeni bir öneri sunulmuştur (Trudnowski & Smith, 1991).

Chao-Rong Chen and Yuan-Yin Hsu; (1991), tarafından yapılan çalışmada sürekli hal kararlılık analizi için jeneratör çıkışlarını ve güç sistemi dengeleyicisi parametrelerini yapay sinir ağ (YSA) yapısına giriş olarak vermişlerdir. Böylelikle senkron jeneratörün sürekli hal kararlılığı için YSA ile yeni bir yapı tasarlamışlardır. YSA'nın çevrim dışı (offline) ortamda eğitimi yapılarak büyük bir güç sisteminde performansı analiz edilmiştir. Bu çalışmayı önemli kılan geleneksel sistemden ayrı olarak tasarlanan ilk çalışmalardan olması ve çalışmanın tam kararlılık göstermesidir (Chao-Rong & Yuan-Yin, 1991).

Yang, T.C.; (1997), tarafından yapılan çalışmada güç sistem dengeleyicisi tasarımı için H_{∞} optimizasyon metodu uygulanmıştır. Çok makineli güç sistemi ve ağırlık fonksiyonu seçimi iki bölümde incelenmiştir. İlk bölümde tek makineli sonsuz baralı sistem için GSD tasarımında H_{∞} optimizasyon probleminde uygulanabilirliğinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde ise H_{∞} optimizasyonun ağırlık fonksiyonlarının seçimi incelenmiş ve GSD tasarımından detaylıca bahsedilmiştir (Yang, 1997).

Gurralla, G. and Sen; (2008), tarafından düşük genlikli salınımların senkron mekinede incelenmesi ve GSD tasarımı için tek makineli sonsuz güçlü bara (single machine infinite bus bar, SMIB) sistemi önerilmiştir. GSD tasarımı için Heffron-Phillips modelini geliştirmişlerdir (Gurralla & Sen, 2008).

Haluk G.; (2010), tarafından yapılan çalışmada enterkonnekte güç sisteminin yük-frekans kontrolüne ilk kez Yapay Arı Kolonisi optimizasyonu algoritması uygulanmış; algoritmanın sistem dayanıklılığına etkisi ve yük-frekans kontrol performansına etkisi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir (Gözde, 2010).

İbrahim EKE, M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU ve İlhan KOCAARSLAN; (2011), tek makineli sonsuz güçlü baraya (single machine infinite bus bar, SMIB) bağlı senkron jeneratörde oluşan salınımları söndürmek için GSD parametrelerinin ayarlanmasıyla ilgili çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada GSD parametrelerini yeni bir yöntem ile belirlemişlerdir. Dayanıklı GSD tasarımı çok değişkenli optimizasyon problemi gibi düşünülerek yapay arı koloni (ABC) algoritması ile

çözülmüştür. Önerilen ABC algoritması tabanlı GSD'nin sağlamlığını ölçmek için, tek makineli güç sisteminde küçük bozucu etkiler verilmiş ve simülasyon çalışmaları analiz edilmiştir (Eke vd., 2011).

S. Duman, A. Öztürk ve N. Tutkun; (2011), tarafından yapılan çalışmada tek makineli sonsuz baralı güç sisteminde Güç Sistemi Dengeleyicisi için diferansiyel evrim (DE) algoritması kullanarak PID kontrolör parametrelerini belirlemişlerdir (Duman&Tutkun, 2011).

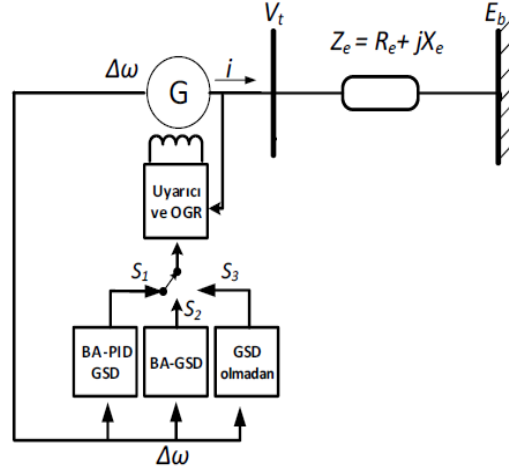
Serdar EKİCİ(2015); tarafından yapılan çalışmada çok makineli güç sisteminde düşük frekanslı salınımları sönmöndürmek için yarasa algoritması optimizasyonu kullanarak Güç Sistemi Dengeleyicisi (GSD) tasarımı gerçekleştirilmiştir(Ekici, 2015).

Geleneksel Güç Sistemi Dengeleyicisi nominal çalışma şartlarında sistemin sürekliliği ve kararlılığını sağlamak için sabit değerli kazanç parametreleri kullanılarak tasarlanırlar. Fakat çoklu çalışma koşullarında sabit değerli kazanç parametrelerinin kullanılması geleneksel GSD'nin performansını büyük oranda etkileyerek azaltmaktadır. Güç Sistem Dengeleyicileri uzun zamandır güç sistemlerinde meydana gelen salınımların sönmölenmesinde kullanılmaktadır. Son zamanlarda, bulanık mantık temelli algoritmalar ile GSD, uyarlanabilir yapay bulanık mantık temelli GSD, hiyerarşik bulanık mantık temelli GSD ve optimizasyon algoritmaları temelli GSD birçok araştırmacı tarafından güç sistemlerinde oluşan salınımların sönmölenmesi ve kararlılığın sağlanması amacıyla kullanılmıştır (Duman&Tutkun, 2011).

Bu makalenin amacı, MATLAB/Simulink ortamında tek makineli sonsuz baralı (TMSB) bir güç sisteminin yarasa algoritması optimizasyonu ile geleneksel ve PID Güç Sistemi Dengeleyicisinin doğrusallaştırılmış sistem öz-değer analizi ve zaman bölgesi simülasyonlarını yaparak parametre değerlerini belirlemektir.

2. Tek Makineli Sonsuz Baralı Güç Sistemi

Şekil 1'de şematik diyagramı gösterilen tek makineli sonsuz baraya bağlı güç sistemi; Sonsuz baraya bir X_e dış reaktans ve R_e direnci vasıtasıyla bağlı bir iletim hattı, generatör, otomatik gerilim regülatörü, uyarma sistemi ve üç farklı durum içeren Güç Sistemi Dengeleyicisinden (GSD) meydana gelmektedir.



Şekil 1. Tek makineli sonsuz baralı sistemin şematik diyagramı

Senkron makineye ait Uyarma ve PSS ilaveli Heffron-Phillips modelini temel alan doğrusallaştırılmış akı-sönümlü modele ilişkin devre eşitlikleri aşağıdaki şekilde tanımlanır. (Sauer vd., 2017; Mondal vd.,2014):

$$\dot{\Delta\delta} = \omega_b \Delta\omega \quad (1)$$

$$\dot{\Delta\omega} = -\frac{K_1}{M} \Delta\delta - \frac{D}{M} \Delta\omega - \frac{K_2}{M} \Delta e'_q \quad (2)$$

$$\dot{\Delta e'_q} = -\frac{K_4}{T'_{d0}} \Delta\delta - \frac{1}{T'_{d0} K_3} \Delta e'_q + \frac{1}{T'_{d0}} \Delta E_{FD} \quad (3)$$

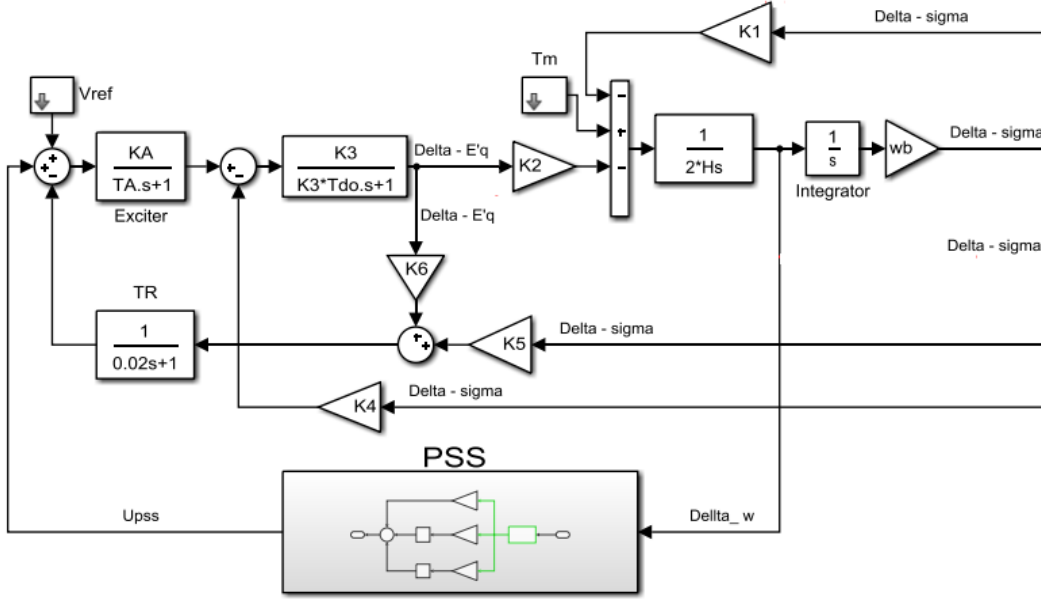
$$\dot{\Delta E_{FD}} = -\frac{K_A K_5}{T_A} \Delta\delta - \frac{K_A K_6}{T_A} \Delta e'_q - \frac{1}{T_A} \Delta E_{FD} + \frac{K_A}{T_A} U_{PSS} \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemlerde $\Delta\delta$ rotor açısı değişimi, $\Delta\omega$ rotor hız değişimi, K_1 - K_6 doğrusallaştırılmış devre sabitleri, K_A uyarıcı kazancı, T_A uyarıcı zaman sabiti, $\Delta e'_q$ q-ekseni geçici gerilimi, ΔE_{FD} uyarma gerilimi, M atalet sabiti, D sönüm katsayısı, T'_{d0}

d-ekseni geçici zaman sabiti, U_{pss} GSD' nin çıkış gerilimleridir. K1-K6'nın hesaplanma formülleri sırasıyla Ek-A'da verilmiştir. Eşitlik (1-4)'ün durum uzay analiz formu Eşitlik 5'de gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta\delta} \\ \dot{\Delta\omega} \\ \dot{\Delta e'_q} \\ \dot{\Delta E_{FD}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_b & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ -\frac{K_4}{T'_{d0}} & 0 & -\frac{1}{T'_{d0}K_3} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta e'_q \\ \Delta E_{FD} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} U_{pss} \quad (5)$$

Doğrusallaştırılmış devre Eşitlikleri (1-4) kullanılarak oluşturulan Tek makineli sonsuz baralı güç sisteminin Phillips – Heffron blok diyagramı Şekil 2'de verilmektedir.



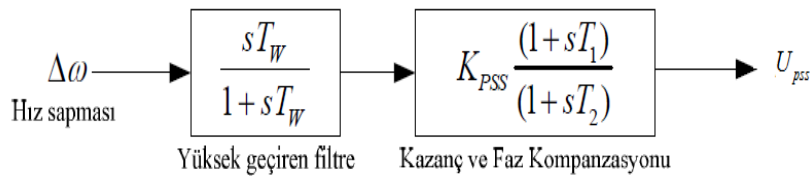
Şekil 2. Phillips – Heffron Tek Makineli Sonsuz Baralı Güç Sisteminin Blok Diyagramı

3. Güç Sistemi Dengeleyicisi (PSS)

Güç Sistemi Dengeleyicisi düşük-frekanslı salınımlarda gerekli sönülmeyi sağlamak amacı ile ortaya çıkmıştır. Çalışmanın bu bölümünde kullanılan Güç Sistemi Dengeleyicisi tanıtılacaktır. TMSB güç sisteminde Şekil 2'de PSS eklenmiş hali ile verilmiştir. Küçük işaret salınımlarını daha iyi hale getirebilmek için Geleneksel PSS yerine PID- PSS sisteme eklenecektir. Her iki sistem için sonuçlar karşılaştırılacaktır.

3.1. Geleneksel Güç Sistemi Dengeleyicisi

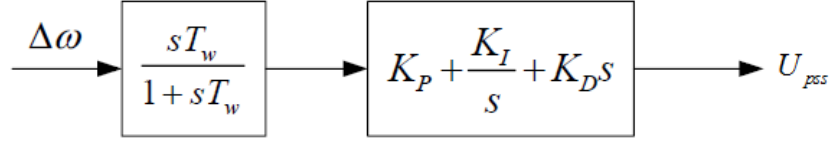
Uyarma sinyali kontrol edilerek generatörün rotor salınımları yok edebilmek için faz ilerlemeli-gerilemeli kompanzator görevi görerek elektrik-moment bileşeni üreten system PSS'tir. Yapısı basit olup uygulamadaki kolaylığı sebebi ile güç sistemi şebekelerinde son dönemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmadaki PSS için temel blok diyagramı Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3'te gösterilen blok diyagramında kazanç K_{PSS} , devre zaman sabiti olan T_w (Kritik bir değer olamamakla beraber 1-20 s aralığındadır) aynı zamanda yüksek geçiren filtre özelliği ve T_1 ve T_2 (faz kompanzasyonu) ise zaman sabitleridir. (Ekinci vd., 2018).



Şekil 3. Geleneksel Güç Sistemi Dengeleyicisi

3.2. PID Güç Sistemi Dengeleyicisi

PID tipi Güç Sistemi Dengeleyicisinin amacı, uyarma girişi ile makine elektriksel momenti arasında faz gecikmesini kompanze ederek, generatörün rotoru için uygun bir moment oluşturmasını sağlamaktır. PID-PSS için K_p oransal, K_I integral, K_D türevsel kazançları, T_w yüksek geçiren filtre devre zaman sabitinden oluşur. Burada genellikle 1-20 s arasında olan T_w 'nin değeri kritik bir değer değildir. PID Güç Sistemi Dengeleyicisi yapısı Şekil 4'de gösterilmiştir (Ekinci vd., 2018).



Şekil 4. PID Geleneksel Güç Sistemi Dengeleyicisi

4. Yarasa Algoritması

Bilim dünyasına 2010 yılında sunulan YA, Xin-She Yang tarafından literatüre sunulmuştur. Bu algoritma doğası gereği ses ile konum belirleme (echolocation) prensibine göre çalışır. Doğal yaşamda birtakım yarasa türleri bir çeşit sonar olan sesle konum belirleme prensibine dayanan bu yöntem ile engellerden kaçınma, karanlıkta tüneme ve hayatta kalabilmek için avlanmalarını bu şekilde yapabilmektedirler. Metasezgisel optimizasyon algoritması olan YA ise yukarıda sayılan doğal süreci taklit ederek optimizasyon problemleri içeren çalışmalara uygulanmak için tasarlanmıştır (Yang, 2010). Burada YA ekolokasyon adı verilen yani sonar radar özelliğini yarasaların avlarının yerlerini tespit etmek ve diğerleri ile iletişim kurmak için kullanır. Algısal bir sistem bir dizi yüksek sesli ultrasonik dalgaların yayılması sonucu meydana gelen yankıdan oluşur. Bu dalgalar ses şiddetleri ile geri döner ve yarasalar belirledikleri avının konumunu bu şekilde tespit ederler. Aşağıda belirtilen bazı temel kurallar YA'nın ekolokasyon özelliğini algoritmaya aktarmak ve çalışma prensibini oluşturmak için uygulanır (Ekici, 2015).

- Yarasalar av/yiyecek ve engelleri ayırt etmek için ekolokasyon özelliğinden yararlanırlar.
- Yarasalar avlarını bulmak için; v_i hızında, x_i konumunda, sabit f_{\min} frekansında, r değişken dalga boyunda ve L_0 ses şiddeti ile rastgele uçarlar. Hedeflerine olan yakınlığa göre yaydıkları sinyallerin frekanslarını düzenlerler ve $[0,1]$ aralığındaki r sinyal yayılım oranlarını ayarlarlar.
- Her yarasanın frekansı, ses şiddeti ve sinyal yayılım oranı değişebilir.
- L_m^{iter} ses şiddeti, L_0 büyük değerden L_{\min} minimum sabit değere kadar farklılık gösterir.

Optimizasyon süresi boyunca her yarasanın x_i konumu ve v_i hızı tanımlanabilir ve güncellenebilir. t zaman adımında x_i^t yeni çözüm değerleri ve v_i^t yeni hızları aşağıdaki eşitliklerden bulunur.

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\alpha \quad (6)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x^*)f_i \quad (7)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (8)$$

Eşitlik 6'da α $[0,1]$ aralığında dağılmış rastgele bir vektörü, f_i yarasanın frekans değerini f_{\min} ve f_{\max} sırasıyla minimum ve maksimum frekans değerlerini ve x^* popülasyondaki mevcut en iyi çözüm değerini ifade etmektedir. Mevcut çözüm değerleri arasından en iyi çözüm değeri seçildikten sonra, yerel rastgele yürüyüş kullanarak yeni bir çözüm değeri üretilir.

$$x_{new} = x_{old} + \varepsilon L^t \quad (9)$$

Eşitlik 9'da ε $[-1,1]$ aralığında rastgele üretilen bir değeri ve L^t t zaman adımındaki bütün yarasaların ortalama ses şiddetini göstermektedir. İterasyon arttıkça ve istenilen hedefin konumuna yaklaştıkça yarasaların ekolokasyon ile ürettikleri sesin şiddeti ve sinyal yayılım oranlarının güncellenmesi gerekmektedir. Yarasa avını bulduğunda genellikle ses şiddeti (L) azalmasına rağmen sinyal yayılım oranı (r) artmaktadır.

$$A_i^{t+1} = \beta A_i^t, \quad r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (10)$$

Eşitlik 10'da β $[0,1]$ aralığında bir sabit ve γ pozitif sabit değerdir. $t \rightarrow \infty$ iken ses

şiddeti $L_i^t \rightarrow 0$ ve $r_i^t \rightarrow r_i^0$ olmaktadır (Ekici, 2015).

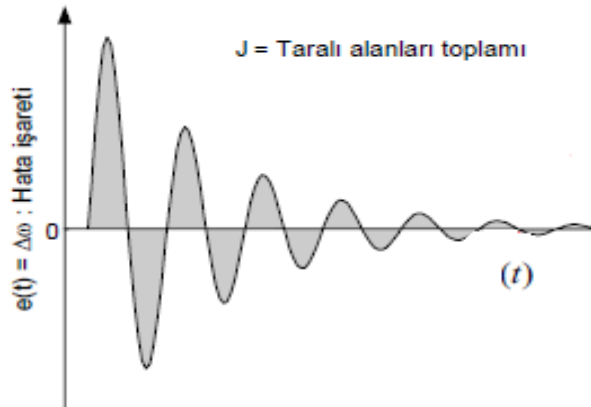
4.1. Yarasa Algoritması Pseudo Kod

Amaç fonksiyonunu oluştur. $f(x), x = (x_1, x_2, \dots, x_d)^T$
 Algoritma parametrelerini belirle. (Popülasyon sayısı, boyut, yarasa sayısı, iterasyon sayısı...)
 Alt ve üst limit değerlerini belirle.
 Yarasa çözüm popülasyonunu oluştur. $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$
 Çözüm popülasyonunu Amaç Fonksiyonunda çöz.
 En iyi çözüm kümesini Best değişkenine ata.
 İterasyonu başlat.
 Frekans (f_i) ve hız (v_i) değerleri ile yeni çözüm (x_i^*) değerlerini oluştur.
 Eğer (rastgele üretilen bir sayı $> r$) ise rastgele yeni çözüm (x_i^*) oluştur. (Random walk) End.
 Limit ayarlaması yap.
 Limitlendirilmiş çözüm popülasyonunu Amaç Fonksiyonunda çöz.
 Eğer ($f(x_i) < f(x_i^*)$ & $r < Ai$) ise yeni üretilen çözümü kabul et Best değişkenini güncelle.
 İterasyonu bitir.
 Sonucu göster.

5. Amaç Fonksiyonu

Bir arızanın veya büyük yük değişikliklerinin ardından güç sistemi kararlılığının iyileştirilmesi ve düşük frekanslı salınımların minimize edilmesi için Güç Sistemi Dengeleyicisi tasarlanır. Salınım bilgileri $\Delta\delta$ rotor açısı değişimi, $\Delta\omega$ rotor hız değişiminden gözlemlenebilmektedir. Bu çalışmada sistemin tekrar kararlı hale getirilebilmesi için $\Delta\omega$ rotor hız değişiminin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda $\Delta\omega$ rotor hız değişimi bilgisi hata olarak kabul edilmiş olup, hatanın karesinin integrali amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Amaç fonksiyonun matematiksel ifadesi Eşitlik 11'de, grafiksel gösterimi Şekil 5'de verilmiştir.

$$J_{Amaç} = \int_0^{t_{sim}} (\Delta\omega)^2 dt \quad (11)$$



Şekil 5. Amaç fonksiyonu

6. Simülasyon

6.1. Test Sistemi

Simülasyonda kullanılan tek makineli sonsuz baralı güç sisteminin hat, generatör ve uyarma sistemi parametreleri Tablo 1'de verilmiştir (Farhad vd., 2018).

Tablo 1. Generatör ve Uyarma Sistemi Parametreleri

Hat	$R_e = 0,0 \text{ pu}; X_e = 0,2 \text{ pu}; V_\infty = 1,05 \text{ pu};$
Generatör	$D = 0,0; H = 5,0; x_d = 1,97;$ $x'_d = 0,3; x_q = 1,9; M = 2 * H;$ $T'_{d0} = 6,84; f = 50 \text{ Hz}; w_b = 2\pi f \text{ rad/s};$ $P = 1.0 \text{ pu}; Q = 0.015 \text{ pu};$
Uyarma	$K_A = 100; T_A = 0,02;$

6.2. PID-Güç Sistemi Dengeleyicisi ve Geleneksel Güç Sistemi Dengeleyicisi Parametrelerinin Yarasa Algoritması İle Belirlenmesi

Bu çalışmada PID - Güç Sistemi Dengeleyicisi optimizasyonu için kullanılacak PID - Güç Sistemi Dengeleyicisi parametre (T_w , K_P , K_D , K_I) limitleri Tablo 2'de, Güç Sistemi Dengeleyicisi parametreleri (T_w , K_{PSS} , T_1 , T_2) Tablo 3'de verilmiştir (Farhad vd., 2018). Sistem kararlılığının sağlanması için $\Delta\omega$ rotor hız değişiminden alınan bilgi hata olarak kabul edilecek olup hatanın karesinin integrali amaç fonksiyonu kabul edilmiştir. Yarasa algoritması kullanılarak amaç fonksiyonunun minimize edilmesi amaçlanmıştır. MATLAB programında kodlanarak çalıştırılan Yarasa algoritması, Simulink'ten aldığı hata bilgisiyle amaç fonksiyonunu minimize etmektedir. Optimizasyonda uygulanan yarasa algoritması parametreleri Tablo 5'de verilmiştir. Yaraların ortamla ses şiddeti (L) ve sinyal emisyon hızı (r) sabit değerler olarak alınmıştır.

Tablo 2. PID- Güç Sistemi Dengeleyicisi Limitleri

GSD Parametreleri	T_w	K_P	K_D	K_I
Alt Limit	1	0	0	0
Üst Limit	20	50	50	50

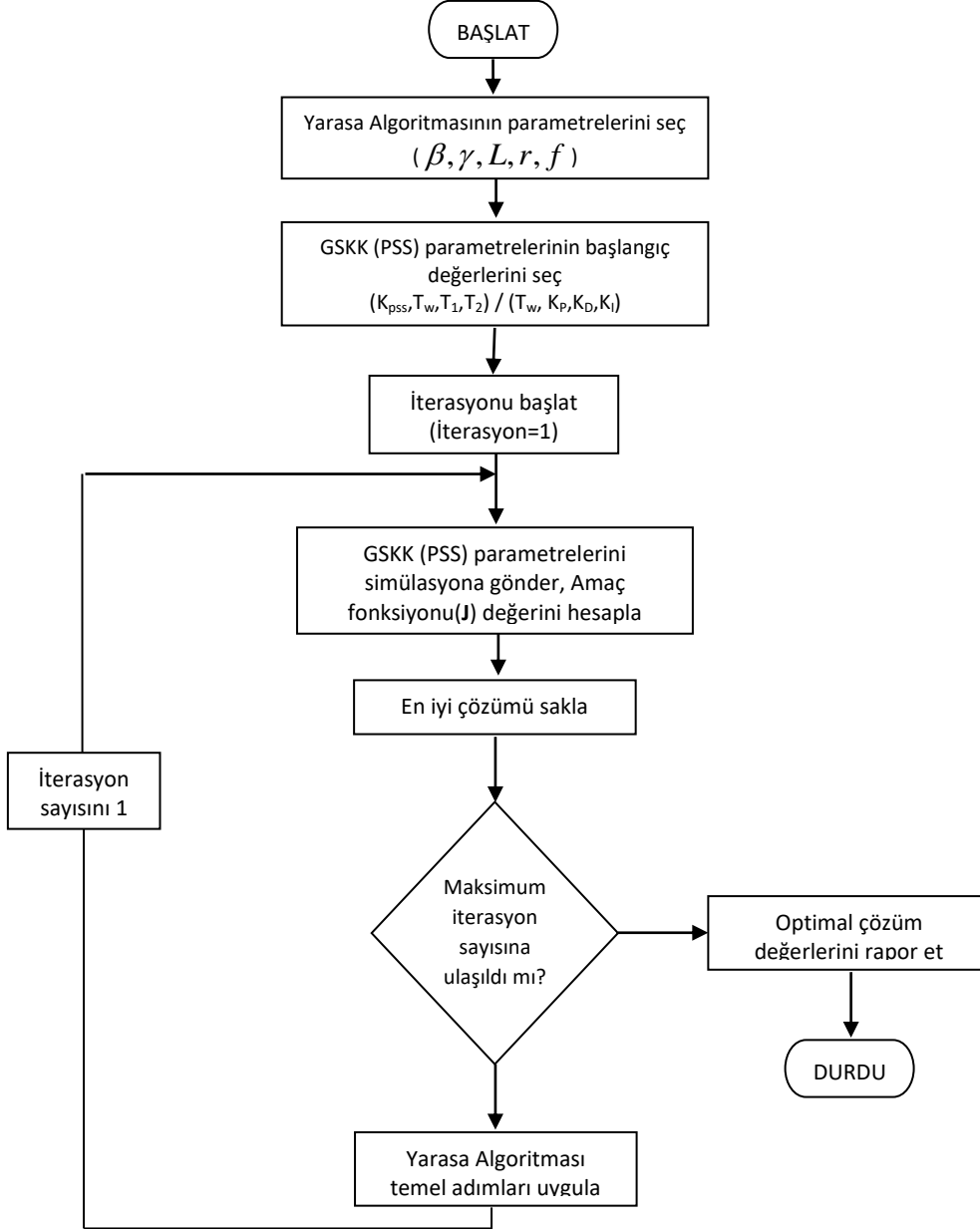
Tablo 3. Geleneksel Güç Sistemi Dengeleyicisi Limitleri

GSD Parametreleri	K_{PSS}	T_w	T_1	T_2
Alt Limit	1	1	0.2	0.02
Üst Limit	50	50	1.5	0.15

Güç sistemine $t=0$ anında mekanik güç girişine ve referans voltaj girişine Tablo 4'de verilen arıza durumları ayrı ayrı uygulanmıştır. Sistem Yarasa algoritması tabanlı Güç sistem kararlı kılıcısına ait akış diyagramı Şekil-5 uyarınca optimize edilmiştir.

Tablo 4. Arıza Durumları

DURUM	V_{ref}	T_m
1	%10	%10
2	%10	%5
3	%5	%10
4	%5	%5



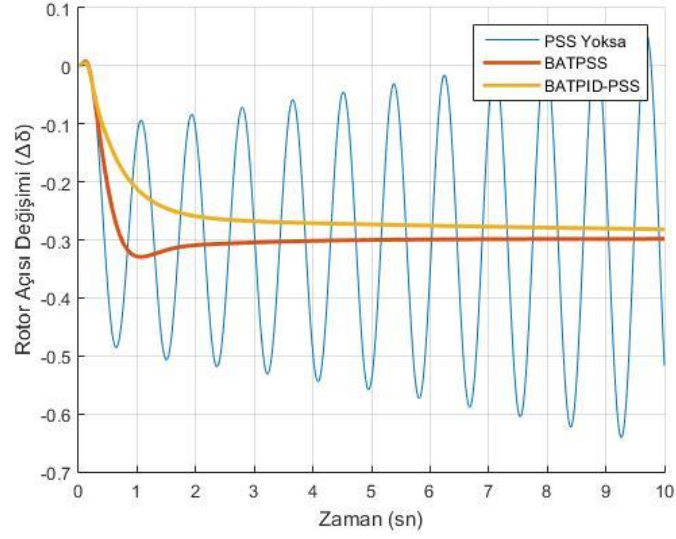
Şekil 6. Yarasa algoritması tabanlı Güç sistem kararlı kılıcısına ait akış diyagramı

Tablo 5. Yarasa Algoritması Parametreleri

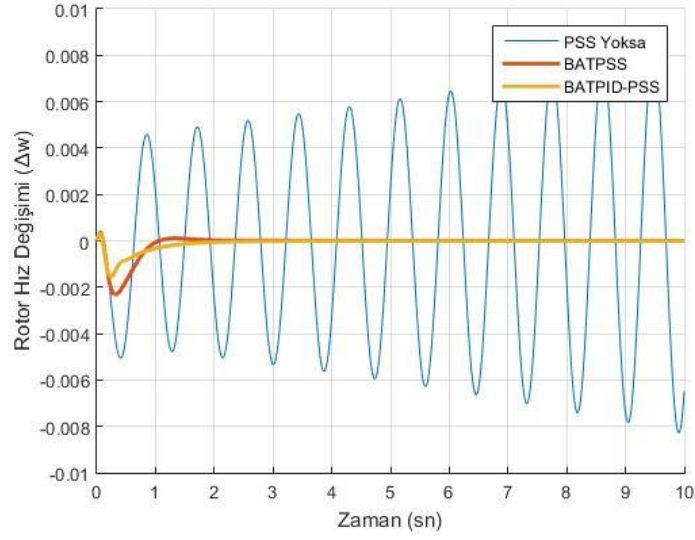
Boyut Sayısı	4
Popülasyon Sayısı	10
Maximum Frekans (f_{max})	4
Ortalama Ses şiddeti (L)	0.25
Sinyal emisyon Hızı (r)	0.6
İterasyon Sayısı	5

6.3. Simülasyon Grafikleri

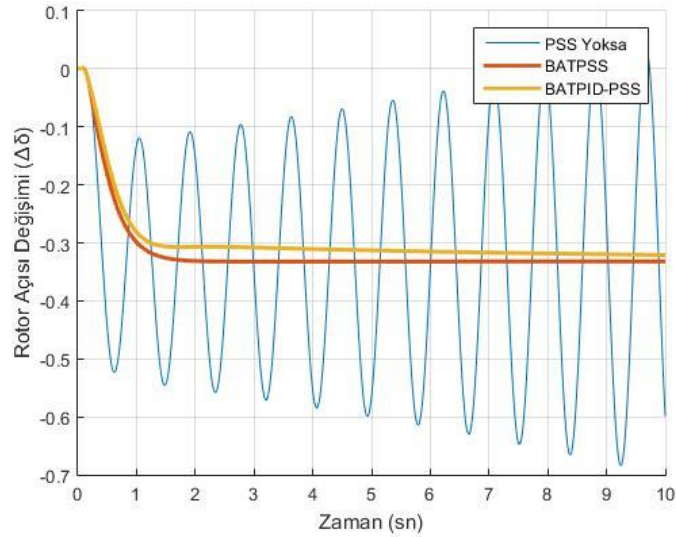
Simülasyona ait Rotor açısı değışı grafikleri ve Rotor hız değışim grafikleri aşağıda Şekil 7-14'de verilmiştir. Simülasyona ait Geleneksel GSD Parametre değeri Tablo 6'da ve PID-PSS Parametre değeri Tablo 7'de verilmiştir.



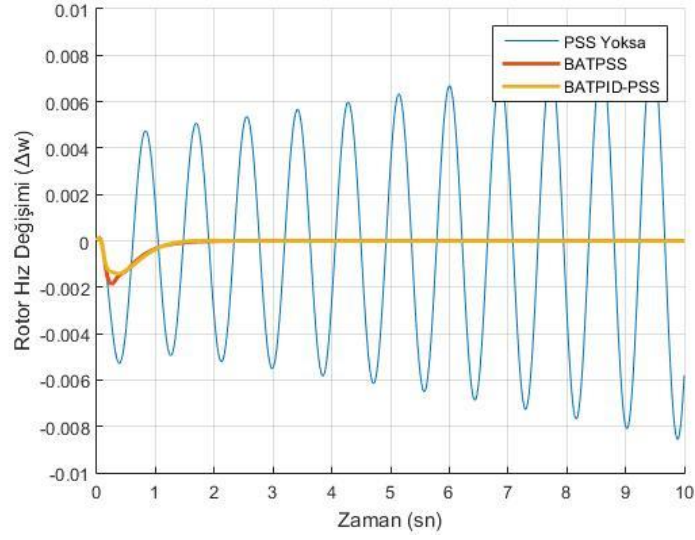
Şekil 7. Durum 1 Rotor açısı değışim grafiği ($\Delta\delta$)



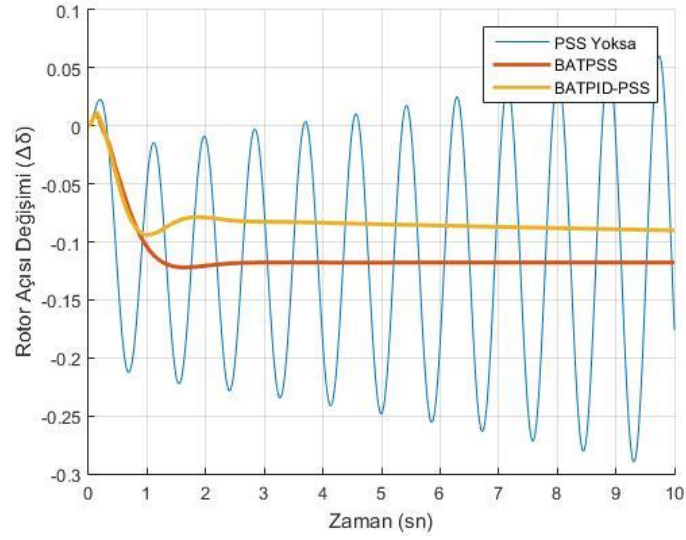
Şekil 8. Durum 1 Rotor hız değışim grafiği ($\Delta\omega$)



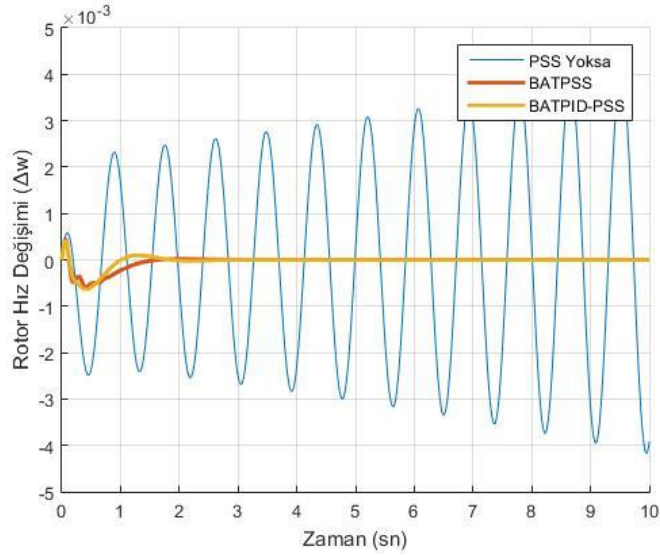
Şekil 9. Durum 2 Rotor açısı değışim grafiği ($\Delta\delta$)



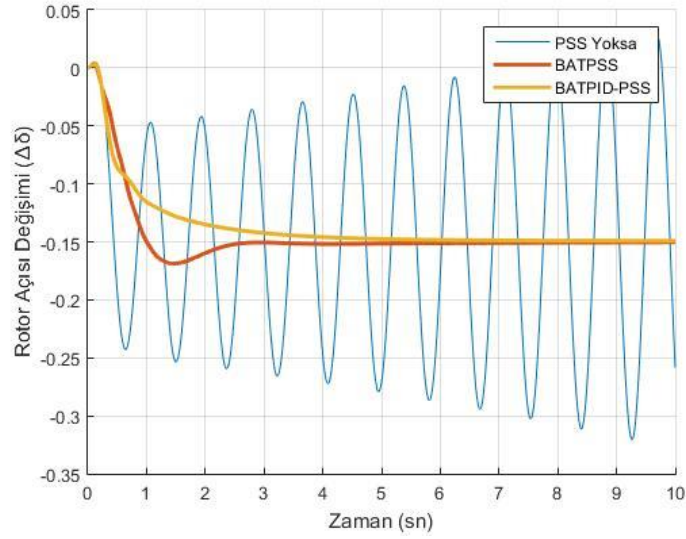
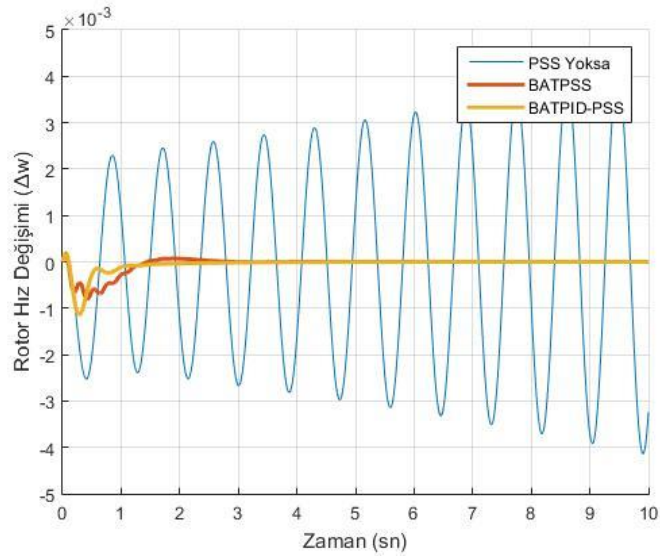
Şekil 10. Durum 2 Rotor hız değişim grafiği ($\Delta\omega$)



Şekil 11. Durum 3 Rotor açısı değişim grafiği ($\Delta\delta$)



Şekil 12. Durum 3 Rotor hız değişim grafiği ($\Delta\omega$)

Şekil 13. Durum 4 Rotor açısı değişim grafiği ($\Delta\delta$)Şekil 14. Durum 4 rotor hız değişim grafiği ($\Delta\omega$)

Tablo 6. Geleneksel GSD Parametre değerleri

DURUM	K_{PSS}	T_w	T_1	T_2
1	13,1992	1,8818	0,2824	0,02
2	25,9908	45,1140	0,2	0,02
3	24,6441	42,7346	0,3549	0,02
4	18,6620	7,8725	0,5382	0,0313

Tablo 7. PID-PSS Parametre değerleri

DURUM	T_w	K_P	K_D	K_I
1	10,6781	43,3883	4,4981	14,9976
2	7,2867	29,4865	7,2347	12,0649
3	18,6910	17,5385	6,8880	42,1725
4	1	30,5910	2,3377	49,0856

Durum 1 için Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde Rotor hız değişiminin ($\Delta\omega$) geleneksel PSS ve PID-PSS için aynı sürede sönümlendirildiği fakat Rotor açısı değişiminin ($\Delta\delta$) geleneksel PSS ile daha erken ve kararlı olarak değiştiği görülmektedir. Durum 2 için Şekil 9 ve Şekil 10 incelendiğinde Rotor açısı değişiminin ($\Delta\delta$) PID-PSS ile daha düşük açıda olduğu fakat grafik kararlılığının olmadığı, grafik eğiminin aşağı yönlü olduğu görülmektedir. Rotor hız değişiminin ($\Delta\omega$) ise geleneksel PSS ve PID-PSS için aynı süre ve kararlılıkta sönümlendiği görülmüştür.

Durum 3 için Şekil 11 ve Şekil 12 incelendiğinde Rotor hız değişiminin ($\Delta\omega$) geleneksel PSS ve PID-PSS için aynı sürede sönümlendiği, Rotor açısı değişiminin ($\Delta\delta$) geleneksel PSS ile daha erken ve kararlı olarak değiştiği görülmektedir.

Durum 4 için Şekil 13 ve Şekil 14 incelendiğinde Rotor hız değişiminin ($\Delta\omega$) PID-PSS ile daha erken sönümlendiği, Rotor açısı değişiminin ($\Delta\delta$) geleneksel PSS ile daha kararlı sönümlendiği görülmektedir. Grafiklerin genel durumu incelendiğinde yarasa algoritması kullanılarak parametreleri belirlenmiş geleneksel PSS'in kararlılığının ve performansının yarasa algoritması kullanılarak parametreleri belirlenmiş PID-PSS'e göre daha kararlı olduğu görülmektedir.

7. Sonuçlar

Bu çalışmada tek makineli sonsuz baralı güç sisteminin rotor açısal kararlılığı sağlamak için metasezgisel bir algoritma olan yarasa algoritmasının doğru sonuca en yakın çözümü bulma prensibinden yararlanılmıştır. Güç sistem dengeleyicisi olarak geleneksel PSS ve PID-PSS aynı parametrelerdeki tek makineli sonsuz baralı güç sistemine farklı arıza durumlar için yarasa algoritması ile uygulanmıştır. Rotor açısı değişim ($\Delta\delta$) grafikleri ve Rotor hız değişim ($\Delta\omega$) grafikleri incelendiğinde yarasa algoritması kullanılarak parametreleri belirlenmiş geleneksel PSS'in ve PID-PSS'in rotor hız değişim ($\Delta\omega$) kararsızlığını sönümlendirdiği, fakat PID-PSS'in rotor açısı değişim ($\Delta\delta$) grafiklerinin kararlı olmadığı, geleneksel PSS'in kararlılığının ve performansının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Teşekkürler

Bu çalışma yazar İbrahim EKE adına "2219 Yurtdışı Doktora Sonrası Araştırma Bursu Programı" kapsamında TÜBİTAK tarafından (Başvuru Numarası: 1059B191300593) ve "Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince" (Proje Numarası: 2012 / 112) desteklenmiştir

Ek Bölüm: Ek-A

Devre sabitleri K1-K6 elde edildiği formüller aşağıda verilmiştir (Demello&Concordia, 1969).

$$i_{qo} = \frac{P_o V_{to}}{\sqrt{(P_o x_q)^2 + (V_{to}^2 + Q_o x_q)^2}} \quad (\text{B-1})$$

$$v_{do} = i_{qo} x_q \quad (\text{B-2})$$

$$v_{qo} = \sqrt{V_{to}^2 - v_{do}^2} \quad (\text{B-3})$$

$$i_{do} = \frac{Q_o + x_q i_{qo}^2}{v_{qo}} \quad (\text{B-4})$$

$$E_{qo} = v_{qo} + i_{qo} x_q \quad (\text{B-5})$$

$$E_o = \sqrt{(v_{qo} + x_e i_{qo})^2 - (v_{qo} - x_e i_{do})^2} \quad (\text{B-6})$$

$$\delta_o = \tan^{-1} \left(\frac{v_{do} + x_e i_{qo}}{v_{qo} - x_e i_{do}} \right) \quad (\text{B-7})$$

$$K_1 = \frac{x_q - x_d}{x_e + x_d} i_{qo} E_o \sin \delta_o + \frac{1}{x_e + x_q} E_{qo} E_o \cos \delta_o \quad (\text{B-8})$$

$$K_2 = \frac{E_o \sin \delta_o}{x_e + x_d} \quad (\text{B-9})$$

$$K_3 = \frac{x_e + x_d}{x_e + x_d} \quad (\text{B-10})$$

$$K_4 = \frac{x_d - x_d}{x_e + x_d} E_o \sin \delta_o \quad (\text{B-11})$$

$$K_5 = \frac{x_q}{x_e + x_q} \frac{v_{do}}{V_{to}} E_o \cos \delta_o - \frac{x_d}{x_e + x_d} \frac{v_{qo}}{V_{to}} E_o \sin \delta_o \quad (\text{B-12})$$

$$K_6 = \frac{x_e}{x_e + x_d} \frac{v_{qo}}{V_{to}} \quad (\text{B-13})$$

Referanslar

- Eke, İ. (2011). Yapay Arı Kolonisi Algoritması Tabanlı Kararlı Güç Sistemi Dengeleyicisi Tasarımı. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Larsen, E. V., & Swann, D.A. (1981). Applying Power System Stabilizers Part I: General Concepts. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100 (6): 3017-3024.
- Larsen, E. V., & Swann, D.A. (1981). Applying Power System Stabilizers Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100 (6): 3025-3033.
- Larsen, E. V., & Swann, D.A. (1981). Applying Power System Stabilizers Part III: Practical Considerations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100 (6): 3017-3024.
- Chi-Jui, W., & Yuan-Yih, H. (1988). Design of self-tuning PID power system stabilizer for multimachine power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(1): 1059-1064.
- Trudnowski, D. J., Smith, J. R., Short, T. A. & Pierre, D. A. (1991). An application of Prony methods in PSS design for multimachine systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(1): 118-126.
- Chao-Rong, Chen., & Yuan-Yin, Hsu. (1991). Synchronous machine steady-state stability analysis using an artificial neural network. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 6(1): 12-20.
- Yang, T.C., (1997). Applying H_{∞} Optimisation Method to Power System Stabiliser Design part 1: Single-Machine Infinite-Bus Systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 19(1): 31-35.
- Gurralla, G., & Sen, I. (2008). A modified Heffron-Phillip's model for the design of power system stabilizers, *International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*, New Delhi, 1-6.
- Gözde, H. (2010). Güç Sistemlerinde Yapay Arı Kolonisi Algoritması Yöntemi ile Yük-Frekans Kontrolü Optimizasyonu. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Eke, İ., Taplamacıoğlu, M. C., & Kocaarslan, İ. (2011). Power System Stabilizer Design for Rotor angle stability. *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol.3, No.2.
- Duman S., Öztürk A., & Tutkun N., (2011). Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı için Diferansiyel Evrim Algoritması Kullanarak PID Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi. 6 th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 269-274.
- Ekinci S., (2015). Power system stabilizer design for multi-machine power system using bat search algorithm. *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 33(4): 627-637.
- Farhad Z., Eke İ., Tezcan S., & Safi S.J., (2018). A Robust PID Power System Stabilizer Design of Single Machine Infinite Bus System using Firefly Algorithm. *Gazi University Journal of Science*, 31(1): 155-172.
- Sauer P.W., Pai M.A., & Chow, J.H., (2017). *Power System Dynamics and Stability: With Synchrophasor Measurement and Power System Toolbox*. Hoboken, NJ, USA: IEEE Press, Wiley.
- Mondal D., Chakrabarti A., & Sengupta A., (2014). *Power System Small Signal Stability Analysis and Control*. Academic Press, London.
- Ekinci S., Hekimoğlu B., & Uysal E., (2018). MATLAB/Simulink ile tek-makinalı sonsuz-baralı bir güç sisteminin kararlılık analizi. *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 20 (1): 450-470.
- Ekinci S., Hekimoğlu B., & Uysal E., (2018). PID güç sistemi kararlı kılıcısı Parametrelerinin belirlenmesi için böbrek-ilhamlı algoritma. *Politeknik Dergisi*, 33(*): *.
- Yang, X.S., (2010). A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm. *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*, 284, 65-74.0
- Demello F.P., & Concordia C., (1969). Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS 88(4), 316-329.



Isıtılan Mekanlarda İç ve Dış Ortam Sıcaklıklarına Bağlı Mevsimsel Yoğuşma Analizi

Seasonal Condensation Analysis in Heated Spaces Based on Indoor and Outdoor Temperatures

İbrahim Uzun¹

Kırıkkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450 Yahşihan, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 15/11/2019

Kabul / Accepted: 15/12/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Isı yalıtım malzemelerinin gözeneklilik, yoğunluk ve ısıl iletkenlik yanında yoğuşma ile ilgili en önemli özellik buhar difüzyon direncidir. Malzemelerin birçoğu katı ve buhar difüzyonu açısından geçirimsiz malzemeler gibi görünseler de neredeyse hepsi buhar geçirgenliğine sahiptirler. Buhar geçirgenliği de malzemeden malzemeye ciddi farklılıklar gösterebilmektedir. Bu farklılıklar yapı içerisinde beraber kullanıldıkları malzemelerle beraber düşünüldüğünde olumlu veya olumsuz etkilere neden olmaktadır. Yalıtım Malzemelerinin buhar difüzyon dirençleri hava içerisindeki buharın az ya da çok geçtiğini göstermektedir. Bu çalışma ile yalıtım malzemelerinden EPS, MW, GC kullanılarak Türk Standartları (TS) 825 standardı içerisinde tanımlanan şekliyle inceleme yapılmıştır. İç sıcaklıkların değişmesi halinde duvar içerisindeki basınç değişimleri gösterilmiştir. Çalışılan iç sıcaklıklar 25°C, 20°C, 15°C, 10°C ve 5°C şeklindedir. Yıllık iklim verileri dikkate alınarak Ankara ili ocak ayı hesaplamaları tablo ve grafiklerle verilmiştir. Düşük sıcaklıklarda dış ortamla denge olduğundan basınç değerlerinin yüksek ve yüksek iç ortam sıcaklıklarında ise basınç değerlerinin düşük çıktığı görülmüştür. İç ortam sıcaklığı yükseldikçe yapı bileşenleri arasında yoğuşmaların olabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“Yoğuşma, TS 825, Buhar difüzyonu, Isı Yalıtım Malzemeleri”

Abstract

Besides the porosity, density and thermal conductivity of thermal insulation materials, the most important property related to condensation is vapor diffusion resistance. Although most of the materials appear to be impermeable to solid and vapor diffusion, almost all of them have vapor permeability. Vapor permeability can also vary considerably from material to material. These differences cause positive or negative effects when considered together with the materials they are used together in the wall. The vapor diffusion resistance of the Insulation Materials shows that the vapor in the air passes more or less. In this study, insulation materials EPS, MW, GC are used as defined in Turkish Standards (TS) 825 standard. If the internal room temperatures change, the pressure changes within the wall are shown. The internal temperatures studied are 25°C, 20°C, 15°C, 10°C and 5°C. Taking into consideration the annual climate data, January calculations for Ankara are given in tables and graphs. As the equilibrium occurs with the outdoor environment at low temperatures, it was observed that the pressure values were high and the pressure values were low at high indoor temperatures. It has been observed that condensation may occur between the building components as the indoor temperature rises.

Key Words

“Condensation, TS 825, Steam diffusion, Thermal Insulation Materials”

Terminoloji

GC	Gaz beton
d	Malzeme kalınlığı, m
EPS	Expanded Polistiren Köpük
k	Isıl iletkenliği, W/(mK)
MW	Mineral yün
q''_x	(x) doğrultusundaki ısı akısı, W/m ²
T	Sıcaklık, K
T_i	İç Sıcaklık, K
T_{iy}	İç Yüzey Sıcaklığı, K
T_d	Dış Sıcaklık, K
T_{dy}	Dış Yüzey Sıcaklığı, K
x	Koordinat doğrultusu, m
P	Basınç, Pa
P_i	İç basınç, Pa
P_s	Su buharı doyma basıncı, Pa
$P_{s,i}$	İç taraf su buharı doyma basıncı, Pa
$P_{s,d}$	Dış taraf su buharı doyma basıncı, Pa
P_d	Dış basınç, Pa
q	Geçen Isı Miktarı, W
Sd	Eşdeğer hava tabakası kalınlığı, m
w''_x	Su buharı akısı, kg/(h.m ²)
β_i	Yüzey su buharı geçirgenliği, kg/(Pa. h.m ²)
δ	Su buharı geçirgenlik direnci, (Pa. h.m ²)/kg
μ	Su buharı difüzyon direnç faktörü(malzemenin su buharı geçirgenliğinin durgun havanıninkine oranı)
μ_p	Su buharı geçirgenliği, kg/(m.h.Pa)

1. Giriş

Isı yalıtım malzemelerinin yoğunluk, gözeneklilik ve ısı iletkenlik gibi fiziksel ve ısı özelliklerinden birisi de buhar difüzyon direncidir. Bu malzemelerin duvar içerisinde yanlış kullanılması, yeterince kalın kullanılmaması ve uygun özelliklerde seçilmemesi buhar difüzyonu açısından önemlidir. Hatta duvarın içerisinde konumlandırılması bile ısı geçirgenlik gibi malzeme iklim ilişkileri açısından değerlendirilmesi gereken bir durumdur. Malzemelerin katılığı buhar geçişi açısından olumsuz gibi görünseler de tamamı buhar geçirgenliğine sahiptirler. Ancak bu geçirgenlik büyüklükleri ısı iletkenlik gibi ciddi farklılıklar gösterebilirler. Isıl iletkenlik duvar içerisinde sıcaklık değişimlerine neden olarak ısı geçirgenliğine etki ettikleri gibi su buharı geçirgenlikleri de duvar içerisinde veya yüzeylerde yoğunlaşmaya neden olabilmektedirler. Yapı içerisinde genelde iç ortamdan dış ortama doğru buhar geçişi söz konusudur. Bu geçiş malzemelere, iç ve dış sıcaklıklara bağlı olarak buhar geçişidir. Normal şartlarda standartlara uygun yalıtım hesaplaması gerçekleştirildiğinde ve uygulandığında yoğunlaşma işleminin gerçekleşmemesi beklenmektedir. Ancak buhar difüzyon direnç faktörü ve bu faktöre bağlı olarak hesaplanan eşdeğer hava tabakası kalınlıkları duvar içerisinde veya yüzeylerinde yoğunlaşmaya neden olabilmektedir. Buhar difüzyon direncinin(Sd) çok olması yoğunlaşma ihtimalini de oldukça artırmaktadır. Buhar difüzyon direnci yüksek malzemelere bazı membranlar örnek olarak verilebilirler. Özellikle su geçirimsiz malzemeler olarak kullanılan gösterilebilir. Su buharı difüzyon direnci yüksek malzemeler duvar içerisinde özellikle de dış duvarlarda kullanılmamalıdır.

Konu ile ilgili çalışmalardan, Edirne ili bölgesinde geçerli iklim koşullarında betonarme duvar bileşenleri için, dış ortam şartlarının periyodik olarak değiştiği, iç ortamın sabit kabul edildiği durumlar için bir bilgisayar yazılımı kullanılarak yoğunlaşma hesabı yapılmıştır [Umaroğulları F., vd., 2011]. Farklı bölge illerinden olan Elazığ, Adana, İstanbul ve Kars ilindeki binaların dış duvarlarında oluşan yoğunlaşma ve buhar difüzyonu sekiz(8) farklı duvar yapısı için TS 825 standardına göre analiz edilmiş olup Glaser grafik yöntemi ile MATLAB'da GUI ara yüzünü kullanarak bir bilgisayar programı hazırlanmıştır[Özel M. vd, 2018]. Betonarme çatı döşemelerinde meydana gelen yoğunlaşma ve buharlaşma miktarları ile ilgili uygulamalar yayımlı yapay yapay sinir ağı kullanılarak çözülmüştür [Keleşoğlu Ö., vd., 2006]. Yoğunlaşma riskinin yüksek olduğu ve yoğunlaşmayı önlemek için g yalıtım kalınlığının artırılması şubat ayı için belirlenerek ısı ve kütle transferi hesaplamaları, farklı iç ortam sıcaklıkları ve bağıl nem koşulları için yapılmıştır[Bademoğlu A. H., vd., 2018].

Bu çalışmada uygulamada aile yaşam koşullarına bağlı olarak iç ortam sıcaklıkları değişebilmektedir. BU değişim yüksek sıcaklıklar şeklinde görülebileceği gibi düşük sıcaklıklar olarak da ortaya çıkabilmektedir. Literatürde yalıtım kalınlıkları, malzeme çeşitliliğine göre oldukça fazla çalışma olmasına karşın iç sıcaklığa bağlı durumun incelendiği durum ile karşılaşmamıştır. Bu durumun yoğunlaşmaya etkisi incelenmiştir. İç sıcaklıkların 25°C ile 5°C arasında olmasına göre duvar bileşenleri arasında, iç ve dış duvar yüzeylerinde kısmi basınç değişimleri elde edilmiştir.

2. Su Buharı Difüzyon Direnç Faktörü (μ)

Su buharı difüzyonu sonucu oluşan yoğuşma, yapı malzemelerine ve yapı malzemelerinde meydana gelen ısı geçişine olumsuz yönde etki eder. Yapı malzemelerinde özellikle soğuk mevsimlerde ortaya çıkan yüzeylerdeki yoğuşma veya terlemeler yapı malzemelerinin fiziksel ve ısıl özelliklerini değiştirirler. Hatta kompozit malzeme içinde yoğuşan su buharı malzemenin absorbe edebileceği doyma neminden fazla ise serbest kalır ve malzeme içinde hareket eder. Bunun sonucu olarak da bu yoğuşmalar malzemesinin yapısını bozacağı gibi malzemenin toplam ısı transferi katsayısını yükseltir, ısı kayıplarını da artırır [Türkiye Enerji Raporu, 2009]. Duvar içerisinde duvar bileşenleri arasındaki yoğuşma yalıtımın iyi olmadığı durumlarda ortam sıcaklığı çok düşüğünde donmalara ve malzeme deformasyonlarının oluşmasına neden olabilmektedir.

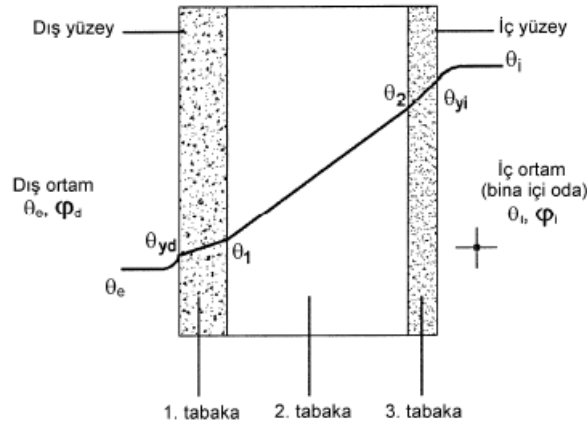
Bilindiği gibi mekanların iç ve dış ortamlarında su buharı doymun hale gelinceye kadar buharlaşmayı sürdürür. Ancak bu durum doyma noktası olarak bilinen değere kadar devam eder. Doyma basıncı ve sıcaklığı arasında belirli bir karşılıklık söz konusudur. Bu değerler aşıldığında bir başka değişle doyma değerinin üzerine çıkıldığında basınç ve sıcaklık artma eğilimindedir.

Ortamdaki veya oda içi ve dış ortamda solunan havalarda su buharı her zaman vardır. Hatta ısı geçişi nasıl ki sıcaklık farkı olduğunda kaçınılmazdır. Su buharı geçişi veya buhar oluşumu da doyma noktasına kadar hep devam eden bir süreçtir. Bunun göstergesi ise bağıl nem olarak tanımlanan ve doyma basıncı ile ortamdaki kısmi basıncın oranlarıdır. Bağıl nem değeri arttıkça ortamdaki buharlaşma olayı zayıflamaktadır. Bu değerlerin veya oranın %100 değerine ulaşması demek daha fazla buharlaşma kabiliyetinin kalmadığı anlamını taşımaktadır. Mekânlarda bu şartların oluşması ve su buharının dışarıya geçişinin sınırlandırılması düşük sıcaklıklı bir duvar bileşenine temas ettiğinde yoğuşarak istenmeyen durum oluşur. Isı transferi nasıl ki sıcaklık farkıyla gerçekleşiyorsa aynı şekilde buhar geçişinin olması da ortamlar arasındaki basınç farklarından kaynaklanmaktadır. Eşitlik (1) ısı akısı verdiği gibi eşitlik (2) de su buharı akısını vermektedir.

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (I)$$

$$w''_x = -\mu_p \frac{dP}{dx} \quad (II)$$

Isı geçişindeki temel yasalardan olan Fourier ısı iletimi yasasında ısı geçişinin yönü sıcaklığı yüksek olan ortamdaki düşük olan ortama doğru olduğu gibi Fick yasasına göre de su buharı geçişinin yönü de kısmi basıncın yüksek olduğu ortamdaki düşük olduğu ortama doğrudur [Bademoğlu vd., 2018].



Şekil 1. Isı geçişi ve buhar geçişi benzerlikleri [TS 825, 2013]

Nasıl ki ısı geçişinde geçişi etkileyen etkin parametre ısıl direnç terimi olup duvarda kullanılan her bir bileşen bir ısıl direnç kaynağıdır. Bütün duvar bileşenlerinin dirençleri toplamı da toplam ısıl direnci vermektedir. Benzer durumda duvar içerisinde duvarı oluşturan bileşenlerin kalınlıklarına bağlı olarak buhar difüzyon dirençleri ve toplamda da toplam buhar difüzyon dirençleri söz konusudur. Eşitlik (3) ve eşitlik (4) bu benzerliği göstermektedir [Böke, 2015].

$$q''_x = \frac{(T_i - T_d)}{R_t} = \frac{(T_i - T_d)}{\frac{1}{h_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_d}} \quad (III)$$

$$w''_x = \frac{(P_i - P_d)}{\delta_t} = \frac{(P_i - P_d)}{\frac{1}{\beta_i} + \frac{d_1}{\mu_1} + \frac{d_2}{\mu_2} + \frac{d_3}{\mu_3} + \frac{1}{\beta_d}} \quad (IV)$$

Eşitlik (3) gösterilen ısı direnç(R_t) bileşen kalınlığı(d) ile ısı iletkenlik(λ) oranı ise buhar geçirgenlik direnci(φ_i) aynı benzer şekilde bileşen kalınlığı(d) ile bileşen buhar geçirgenliğinin(μ_p) bir oranları toplamıdır. Isı geçişinde nasıl ki ortam sıcaklıkları belirlenerek hesaplamalar gerçekleştiriliyorsa yine benzer şekilde ortam sıcaklıklarına bağlı kısmi doyma basınç değerlerinden hareketle duvar ara yüzeylerindeki kısmi basınç değerleri hesaplanarak değerlendirilmeler yapılmaktadır.

$$\varphi_i = \frac{(P_i)}{P_{d,i}} \quad (V)$$

$$\varphi_d = \frac{(P_i)}{P_{d,d}} \quad (VI)$$

Bu çalışmada EPS- genişletilmiş Polistren köpük, MW-Mineral Yün, GC-Gaz Beton malzemeler örnek olarak kullanılmıştır. Bu malzemelerde Tuğla 19 cm, EPS için 5cm ve 8cm, MW için 5 cm ve GC için 20cm kalınlıklarında alınarak duvar ısı direnç, su buharı geçirgenlik dirençlerine karşılık gelen eşdeğer hava tabakası kalınlıkları(S_d) hesaplanmıştır. Bunlar hesaplanırken beş farklı durum değerlendirmeye alınmıştır. Duvarın her iki tarafında sıva bulunmak şartıyla, sadece tuğla(Yalın), sadece GC, tuğla-EPS-5 cm(EPS-5), tuğla EPS-8 cm(EPS-8) ve tuğla-MW-5cm(MW-5) kullanılmıştır. Tablo 1.de bazı malzemelerin su buharı difüzyon direnç faktörleri verilmektedir[TS 825,2013].

3. Su Buharı Yoğuşması

Duvarın iki yüzü arasında kalan kompozit yapıda her bir bileşen kendi başına ısı direnç gibi buhar difüzyonuna direnç teşkil eder. Duvarın bir tarafında iç ortam, diğer tarafında dış ortam ve bu ortamların belirlenen sıcaklık değerleri söz konusudur. Bu sıcaklıklara karşılık gelen iç ortam bağıl nem(%65) ve dış ortam bağıl nem(%76) değerleri bulunmaktadır. İç ve dış ortam arasında sıcaklıklar farklı olduğundan nem değerleri de değişik olmaktadır. Bu nem farkından dolayı su buharı kütle geçişi nem değerinin yüksek olduğu bölgeden düşük olduğu bölgeye doğru gerçekleşmektedir. Bu geçiş ortamların kısmi buhar basınç farklarından kaynaklanmaktadır. Seçilen iç ve dış ortam sıcaklıklarına bağlı olarak içerden dışarıya doğru doğrusal değiştiği düşünülen bir kısmi basınç değeri değişimi eğrisi bulunmaktadır. Seçilen malzeme ve bu malzemelerin ısı iletkenlik ve su buharı difüzyon direnç faktörlerine bağlı olarak bileşen yüzeylerinde sıcaklıklar hesaplanır. Bu sıcaklıklara bağlı olarak belirlenen kısmi buhar basınçları bulunarak her bir bileşen üzerinde hesaplanan kısmi buhar basınç eğrileri çizilir. Yeni çizilen eğrilerin standart Pi-Pd eğrisinin üzerinde kalması beklenir. Eğer hesaplama sonucu elde edilen verilerden çizilen kısmi buhar basıncı çizgileri Pi-Pd eğrisi ile çakışma göstermesi durumunda yoğuşmalar meydana gelebilir sonucuna varılır. Mevsimsel olarak kötü yalıtım ve buhar geçirgenliği söz konusu olduğunda duvar bileşenleri arasında veya yüzeylerinde 0°C'nin altında sıcaklıklar söz konusu olduğunda donma bile meydana gelebilir.

Duvar bileşenleri arasında meydana gelebilecek yoğuşma malzemelerin bozulmasına, donatılı kısımların paslanmasına ve işlev ve dayanımlarının değişmesine neden olacaktır. Bu durum deprem riskleri açısından olduğu gibi ısı hesapların sapmasına da önemli derecede etki edebilmektedir. İstenmeyen durumların olmaması için TS 825 standardında tanımlandığı gibi ısı geçişi hesabına benzer şekilde buhar geçişi hesaplamaları da yapılmak durumundadır. Böylece hem yaşam konforu sağlanmış hem malzemelerin ömürleri uzatılmış ayrıca da enerji tasarrufu elde edilmiş olacaktır.

Tablo 1. Bazı Yapı Malzemelerinin Su Buharı Difüzyon Direnç Faktörleri

Yapı malzemesi	Su buharı difüzyon direnç faktörü (t)
EPS	40/100
Mineral yünler	1
Kireç Harcı, Çimento Harcı	15/35
Dökme Asfalt Kaplama	50000
Mermer/Granit	10000
Normal Donatılı	80/130
Normal Beton Donatısız	70/120
Gaz beton yapı levhaları	5 / 10
Tuğla duvarlar	5/10

4. Yoğuşma Analizi

Homojen malzemelerde yalıtım ve yoğuşma hesaplamalarında ısı iletkenlik(λ) ve su buharı difüzyon direnç faktörü(φ) kullanılırken kompozit malzeme ve karma duvarlarda ısı direnç(R) ve eşdeğer hava tabakası kalınlığı(S_d) kullanılmaktadır. Eşdeğer hava tabakası kalınlıkları bulunduğu duvar bir bakıma hava olan bir ortam şeklinde tasarlanmıştır. Her bir bileşen eşdeğer hava tabakası kalınlığına karşılık gelen bir değere sahip olmaktadır. Yoğuşma analizinde bilindiği üzere dış ve iç hava sıcaklığı ile İç ve dış ortam bağıl nemi esas alınarak hesaplamalar yapılmaktadır. İç ortam bağıl nem değeri(φ_i) mekanik havalandırma yapılan mekanlarda %55 ve doğal havalandırma ile havalandırılan ortamlarda %65 olarak alınmaktadır[TS 825,2013].

Yoğuşma analizinde iç ve dış ortam yüzey sıcaklıkları bilindiği üzere Newton'un Soğuma yasası ile hesaplanmaktadır. Bu hesaplamada iç ve dış ortam ısı taşınım katsayıları ve buna bağlı olarak taşınım dirençleri bilinmektedir. Bir başka deyişle TS 825 ile tanımlanmış bulunmaktadır. Duvarın iç ve dış yüzey sıcaklıkları sırasıyla eşitlik(VII) ve eşitlik (VIII) ile verilmiştir.

$$T_{iy} = T_i - R_i \cdot q \quad (\text{VII})$$

$$T_{dy} = T_d + R_d \cdot q \quad (\text{VIII})$$

Yoğuşma analizinde iklim bölgelerine göre aylık ortalama sıcaklıklar üzerinden ve bu sıcaklıklara karşılık gelen dış ortam bağıl nemleri esas alınarak yoğuşma hesaplamaları yapılmaktadır. Diğer taraftan dış ortamı iç ortamdaki ayırarak duvarın iç ortam sıcaklığı ve bağıl nem değeri de diğer taraftaki yoğuşmaya esas değeri oluşturmaktadır. Bu çalışmada ele alınan iklim bölgesi 3. Bölge ve bu bölgede yer alan Ankara ili hesaplanmıştır. Hesaplamalar beş(5) farklı duvar bileşeni için yapılmıştır. Duvar bileşenleri ile bileşenlerin boyutsal ve ısıl özellikleri Tablo 2.'de verilmiştir.

Tablo 2. Duvar Bileşen Malzemelerinin Özellikleri

No	MalzemeAdı	Isıliletkenlik , λ , W/(mK)	SuBuharıDifüzyonDirençFaktörü, μ	Yoğunluk, ρ , kg/m ³
1	Kireç Çimento Harçlı Sıva	1,00	25,00	1800
2	Tuğla TS EN 771-4	0,50	7,5	1200
3	EPS035 TS EN 13163	0,35	35	16
4	MW040 TS EN 13162	0,40	1	150
5	GC TS EN 771-4	0,18	7,50	550

Tablo 3. Yoğuşma Hesabı Yapılan Duvar bileşenleri ve Kalınlıkları

No	Duvar Bileşenleri Kalınlıkları, m					
	İç Sıva	Tuğla	EPS	MW	GC	Dış Sıva
1	0,003	0,19	-	-	-	0,003
1	0,003	0,19	0,05	-	-	0,003
2	0,003	0,19	0,08	-	-	0,003
3	0,003	0,19	-	0,08	-	0,003
4	0,003	-	-	-	0,20	0,003
5	0,003	0,19	-	-	-	0,003

Genelde yoğuşma analizi önceki bölümlerde verildiği şekliyle iç sıcaklıklar ve dış ortalama aylık sıcaklıklar üzerinden yapılmaktadır. Bu hesaplama iç ve dış ortam sıcaklıklarının sabit kaldığı varsayımı üzerine kurulmuştur. Bu çalışmada bu standart hesaplama yanında iç sıcaklıkların değişmesi durumunda duvar bileşenleri ara yüzeylerindeki sıcaklıklar bütün alternatifler için hesaplanmıştır. Tablo 5.'de sadece ocak ayına ait farklı iç sıcaklıklar için yüzey sıcaklıkları verilmiştir.

Tablo 4. Yoğuşma Hesabına Esas Alınan İl için Aylık Ortalama Sıcaklık, Bağıl nem, İç ve Dış Ortam Sıcaklıkları

Aylar	Dış Ortam Sıcaklığı, Td, °C	Dış Ortam Bağıl Nem, %□	İç Ortam Sıcaklığı, Ti	İç Ortam Bağıl Nem, %□
Ocak	-0,3	76		
Şubat	0,1	71		
Mart	4,1	65		
Nisan	10,1	62		
Mayıs	14,4	59		
Haziran	18,5	55		
Temmuz	21,7	49	20	65
Ağustos	21,2	48		
Eylül	17,2	52		
Ekim	11,6	62		
Kasım	5,6	72		
Aralık	1,3	78		

Tablo 5. Yalın Duvar İçin Farklı İç Ortam Sıcaklıklarında Ocak Ayı İçin Yapı Bileşenleri Ara Yüzey Sıcaklıkları

	Sıcaklık (°C)				
Dış Ortam	-3.100	-3.100	-3.100	-3.100	-3.100
Dış Yüzey	-1.437	-1.733	-2.029	-2.325	-2.621
Sıva	-1.313	-1.631	-1.949	-2.267	-2.585
Tuğla	14.483	11.355	8.226	5.097	1.968
İç Sıva	14.608	11.457	8.306	5.155	2.004
İç Ortam	25.000	20.000	15.000	10.000	5.000

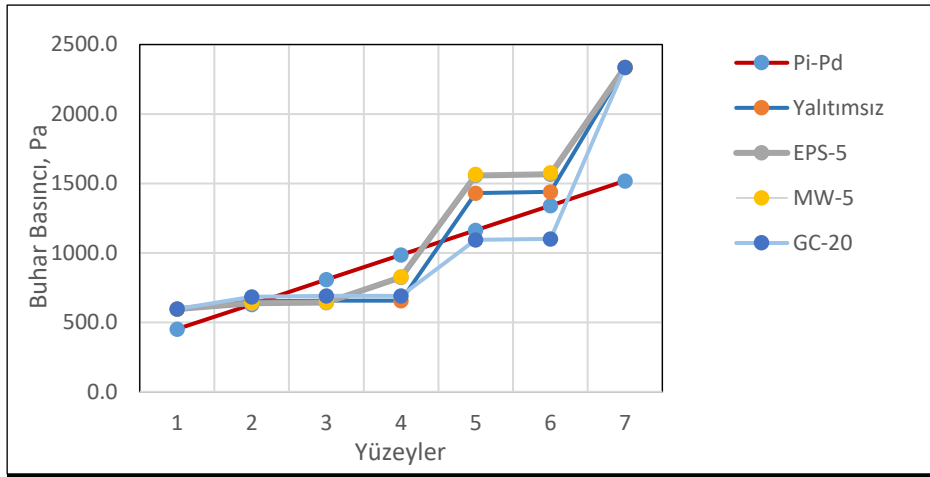
5. Sonuçlar

Duvar içerisinde veya yüzeylerinde yoğuşma olup olmayacağı hesaplamalar sonucunda belirlenir. Ancak su buharı difüzyon dirençleri yüksek malzemenin duvarın herhangi bir yerinde kullanılması hatta çok ince bir katman şeklinde dile olması su buharı geçişini engelleyecektir.

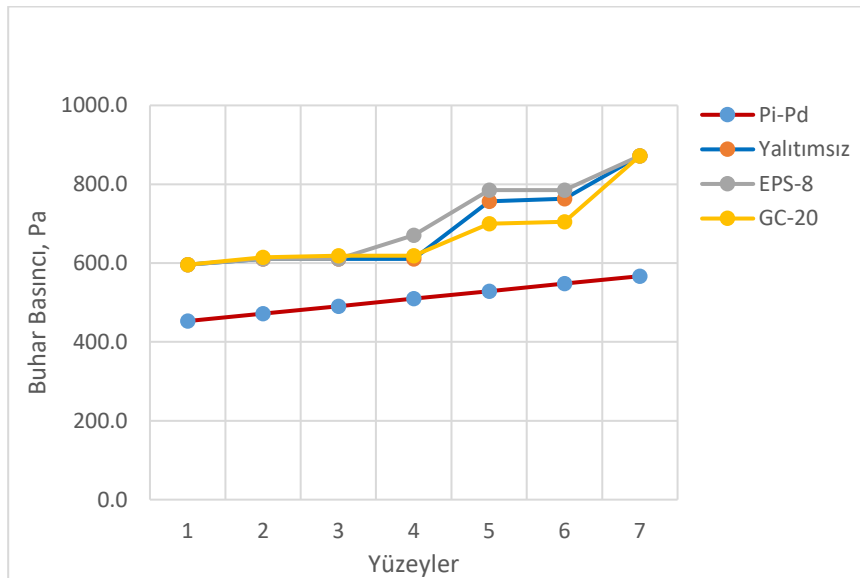
Duvar bileşenlerinde yaygın olarak kullanılan sıva, çimento harcı donatılı ve donatısız beton ve tuğla duvarların buhar difüzyon direnç faktörleri EPS gibi kapalı gözenekli yalıtım malzemelerin değerlerine yakındır. Bu bakımdan bileşenlerin buhar difüzyon dirençlerinin birbirlerine yakın malzemelerden oluşması buhar geçişini benzer bir hız ve akıda dışarıya veya içeriye geçirecektir. Yukarıdaki bölümlerde gösterildiği gibi EPS için bu değer kırk(40) civarında iken Mineral yünlerde bir(1) olarak alınmaktadır. Mineral yünlerde çeşitlilik ve yoğunluklar dikkate alındığında kabul edilen bir(1) değeri incelemeye değer bir durumdur. Bunların yanında duvarların doğal taşlarla, mermer, granit gibi veya daha yoğun malzemelerle kaplanması, çok geçirimsiz boyalarla boyanması durumunda su buharı geçişi ciddi bir direnç ile karşılaşacağı açıktır. Bu tür malzemelerin içeriden kaplanması durumunda ise iç ortam yüzeylerde terlemeler görülebilir. Elbette ortam sıcaklık ve nemine bağlı olarak değişebileceği unutulmamalıdır. Su buharı difüzyon direnç faktörü yüksek olan malzemelerin kompozit yapı içerisinde kullanılması durumunda kısmi buhar basıncı değerleri arasındaki fark büyüyeceğinden basınç eğrisinin eğimi artacaktır. Kısmi buhar basıncı iç ve dış ortamın sıcaklık ve bağıl nemi ile ilişkilidir. Şekil 5.'de malzemelerin her iki tarafındaki basınç doyma basıncı olup sadece sıcaklığın fonksiyonudur. Eğim Sd değeri ile değişmekte olup ürünlerin ısı yalıtım fonksiyonu olmadığı ve Sd değeri büyük ise eğim azalacaktır. Bu durumda hem kalınlık hende su buharı difüzyon direnç faktörü eğimi etkileyen büyüklüklerdir.

Tablo 6. Duvar bileşenlerinin eşdeğer hava tabakası kalınlık(Sd) değerleri

Duvar Bileşenleri	Kalınlık d	Difüzyon Direnç Faktörü($\frac{1}{\alpha}$)	Eşdeğer Hava Tabakası (Sd)				
			Yalın	EPS-5	EPS-8	MW-5	GC-20
Dış Sıva	0,003	25,0000	0,075	0,0750	0,075	0,075	0,075
EPS-5cm	0,05	35,0000		1,7500			
EPS-8cm	0,08	35,0000			2,800		
MW-5cm	0,05	1,0000				0,050	
GC-20cm	0,2	7,5000					1,500
Tuğla	0,19	7,5000	1,425	1,425	1,425	1,425	
İç Sıva	0,003	25,0000	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075
Toplam, Sd	-	-	1,575	3,325	4,375	1,625	1,650

**Şekil 2.** Farklı Duvar bileşenleri için 20°C iç sıcaklıkta ocak ayı için kısmi basınç değişimleri

İç ortam sıcaklığı ile dış ortam sıcaklığı arasında bir sıcaklık skalası ile duvar içerisinde sıcaklıklar oluşacaktır. Ocak ayı için yalın duvar iç sıcaklıkları Tablo 1.'de verilmiştir. Buna benzer olarak farklı yalıtım ve yapı malzemelerinin kullanılmasında bu ara sıcaklıklar değişiklik gösterecektir. Ocak ayı için 20°C iç sıcaklık durumunda Pi-Pd değişimine göre diğer yalıtım ve yapı malzemelerinin (EPS-5, MW-5, GC-20 ve sadece 19cm delikli tuğla kullanım durumuna göre) kısmi buhar basıncı değişimleri Şekil 2.'de verilmiştir. Burada GC-20 kullanıldığında ayrıca delikli tuğla kullanılmadığı unutulmamalıdır. Benzer şekilde iç sıcaklığın çok düştüğü bir durum olan 5°C için Yalıtımsız (sadece delikli tuğla ve sıvaların bulunduğu durum), EPS-8(tuğla dışına 8cm EPS uygulanması) ve GC-20(tuğla yerine 20cm gaz beton kullanılması durumu) kullanımında kısmi buhar basınçlarının değişimi Şekil 3.'de gösterilmiştir.

**Şekil 3.**Farklı Duvar bileşenleri için 5°C iç sıcaklıkta ocak ayı için kısmi basınç değişimleri

Buhar basıncı sıcaklık değişimlerinde iç sıcaklık düştüğünde duvar bileşenlerinin hepsinde basınç değerlerinin belirlenen Pi-Pd basınç eğrisinin üzerinde kaldığı görülmektedir. Bunun yanında normal ısıtma şartlarında, iç sıcaklık 20°C ve dış sıcaklık ortalama iklim verilerindeki sıcaklıkta, olduğunda basınç eğrilerinin bazı malzemeler için kesiştiği ve yoğuşma durumunun ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durumun duvar bileşenlerinde eşdeğer hava tabakası kalınlığına göre basınç değişimlerinin gösterilmesi ile daha iyi görülebileceği açıktır. Bu çalışmada o grafik veya verilere yer verilmemiştir.

Kaynaklar

Bademoğlu A.H., Canbolat A.S. ve Kaynaklı Ö., “Bina Dış Duvarlarında Yoğuşma Dikkate Alınarak Gerekli Yalıtım Kalınlığının Belirlenmesi”, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 23, Sayı 3, 2018.

Bademoğlu A. H., Canbolat A. S. ve Kaynaklı Ö., “Bina Dış Duvarlarında Yoğuşma Dikkate Alınarak Gerekli Yalıtım Kalınlığının Belirlenmesi Bitlis İli İçin Örnek Çalışma”, Uludağ Ün. Müh. Fak. Dergisi, Cilt (23), Sayı (3), s. 333-340, 2018.

Böke B., “Yüzeyde Yoğuşma Problemi”, 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 8-11 Nisan, 2015, İzmir.

Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2009, Türkiye Enerji Raporu 2009, Ankara.

Keleşoğlu Ö. ve Fırat A., “Çatı Döşemesinde Meydana Gelen Yoğuşma ve Buharlaştırma Kütlelerinin Yapay Sinir Ağları ile Tahmin Edilmesi”, S.Ü. Müh. Fak. Dergisi, C(25), S(1-2), s. 49-56, 2006

Özel M. ve Beyazıt N. İ., “Yalıtımın Duvar İçerisindeki Farklı Konumlarına Göre Yoğuşma Analizi”, DÜMF Mühendislik Dergisi 9:2,785-794, 2018.

Türk Standartları, 2013, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları.

Umaroğulları F., Zorer Gedik G. ve Mihlayanlar E., “Periyodik Rejimde Yalıtımlı ve Yalıtımsız Betonarme duvarlarda Yoğuşma Denetimi: Edirne Örneği”, Megaron, Yıldız Teknik Üniversitesi, Cilt Vol (6), Sayı (1), 13-20, 2011.



Estimation of Pipeline Embedment in Soft Submarine Soils by Different Methods

Zeynep H. Özkul¹

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Civil Engineering, Ankara

Başvuru/Received: 30/09/2019

Kabul / Accepted: 11/01/2020

Çevrimiçi Basım / Published Online: 13/01/2020

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Abstract

The embedment of subsea pipelines in soft submarine clay is a key parameter in pipe-soil interaction studies of offshore deep water oil and gas field developments. A number of calculation methodologies exist, some of which are based on empirical evidence. Pipeline embedment depends on the active undrained shear strength and unit weight of the soil and the properties of the pipeline (i.e. weight and dimensions). The embedment is also influenced by stress concentrations occurring due to the geometry of the pipe catenary and by the cyclic motion of the catenary at the touchdown point. In this study, the methods typically used in the industry, such as those proposed by Terzaghi (1967), Dunlap et al. (1990) and Verley & Lund (1995) are compared with the methods recommended in DNVGL-RP-F114 (2017). The calculated embedment from each method are compared for typical pipe properties and soil strength and discussed in view of field observations reported in the literature. The older methods were found to typically underestimate embedment for low shear strength profiles.

Key Words

“pipeline embedment”, “bearing capacity”, “marine clays”, “pipe soil interaction”

1. Introduction

The life-long integrity of pipelines in offshore deep water oil and gas projects is critical for the safe and profitable operation of a site. The embedment of these exposed pipelines is a significant factor influencing its on-bottom stability and buckling potential. At many locations, these pipelines rest on, and are partially embedded in very soft clay-rich marine sediments. They are exposed to a variety of environmental loading conditions including waves and bottom currents.

Accurate prediction of on-bottom pipeline embedment has been a subject of study for a number of decades. Offshore pipelines are subjected to oscillatory forces and displacements during installation and to wave and/or current loads during operation (Wolfram et al., 1987; Allen et al., 1989; Hale et al., 1989 and AGA/PRC, 1993). Pipeline embedment essentially determines the magnitude of the pipe-soil contact area which, in turn, affects the soil resistance that may be mobilized during axial and lateral movements of the pipeline. Hence, the degree of embedment impacts both the on-bottom stability and the internal stresses that develop within the pipe cross-section.

In the late 1980's, the PIPESTAB project conducted by SINTEF (Wagner et al. 1987) and those by the American Gas Association/Pipeline Research Committee (AGA/PRC, 1993) developed models for use in clays. Models based on empirical evidence were proposed by Dunlap et al. (1990) and Verley and Lund (1995). Upper and lower bound plasticity solutions to the embedment problem in clay were presented by Murff et al. (1989). White and colleagues published numerous papers on the topic as part of the SAFEBUCK JIP (Randolph and White, 2008; Westgate et al, 2010; White et al., 2015; White et al, 2017). Based on improved understanding of the mechanisms involved, revised guidelines were published in DNVGL-RP-F114 (2017) for the calculation of pipeline embedment under drained and undrained loading conditions.

Many projects designed and constructed prior to the latest publications have used earlier empirically derived methods. It will be useful to operators of such assets to evaluate how the results of these earlier methods compare with those that are currently recommended. In this study, pipeline embedment calculations based on the frequently used Dunlap et al. (1990) and Verley and Lund (1995) methods are compared with the more recently recommended DNVGL-RP-F114 (2017) method. Parameters used in the calculations include two pipeline sizes and three soil profiles typical of the highly plastic clays found in the deep water subsea environment.

2. Materials and Methods

2.1. Design Parameters

The pipeline properties used in this study are summarized in Table 1. Offshore pipelines are designed and manufactured specific to each site. Pipe 1 and Pipe 2 are examples of production and gas export pipelines used in the industry. Their specific gravity is 1.44 for Pipe 1 and 1.79 for Pipe 2. The soil properties used in this study are summarized in Table 2. They are based on unit weight and minivane tests conducted on box core samples collected from the top 1 m of the seabed. Undisturbed and remolded design soil strength parameters shown are valid for the top 0.6 m of the seabed (i.e. maximum depth of testing). A range of shear strengths are generally encountered along a pipeline route. This variability is accounted for by using multiple representative profiles: high, average and low strength profiles.

Table 1. Pipeline Parameters

Pipe Property	Units	Pipe 1	Pipe 2
Steel density	kg/m ³	7846	7846
Seawater density	kg/m ³	1025	1025
Outer diameter (coated), D	m	0.413	0.330
Unit weight (empty) in air	N/m	1,933.7	1539.7
Unit weight (empty) submerged, P	N/m	588.1	680.1
Pipe Bearing Pressure, P/D	N/m ²	1,424	2,061

Table 2. Soil Parameters

Soil Property	Units	Soil Parameter Range		
		Low	Average	High
Undrained shear strength at mudline	kN/m ²	0.479	0.958	1.293
Undrained shear strength at 0.61 m	kN/m ²	6.708	8.624	10.204
Remolded shear strength at mudline	kN/m ²	0.096	0.287	0.431
Remolded shear strength at 0.61 m	kN/m ²	1.533	2.300	3.593
Submerged unit weight of soil at mudline	kN/m ³	2.51	2.83	3.14
Submerged unit weight of soil at 0.61 m	kN/m ³	4.24	4.56	4.87

2.2. Design Approach

Figure 1 shows a cross-section of a pipeline with outer diameter, D_o , and submerged empty weight, P , embedded to a depth z , on the seabed. The embedded portion of the pipe forms a segment of the pipe cross-sectional area. A line passing through the corner of this segment at mudline and the center of the pipe forms an angle θ with the vertical. Because of the circular shape, both θ and the width of the bearing area, B , are functions of embedment z .

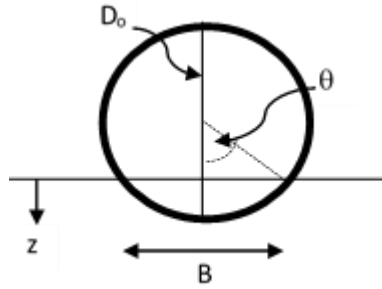


Figure 1. Partially embedded pipeline resting on the seabed.

The undrained vertical embedment problem shown in this figure may be solved using a number of different calculation models as described below. The embedment value calculated using classical bearing capacity analysis is sometimes referred to as the “static embedment” since it considers only the influence of the pipeline’s static submerged weight, P , and neglects any other effects caused by the installation process. The pipe laying process produces both stress concentrations at the touch-down point (due to the pipeline catenary) as well as dynamic effects caused by the horizontal and vertical motions of the pipeline. The as-laid embedment, obtained from field survey studies, has been found to be significantly larger (Westgate et al., 2010) than this static embedment. To account for these effects, empirical equations based on observed field and laboratory findings were developed and used in the industry. Such methods include those proposed by Dunlap et al. (1990) and by Verley and Lund (1995).

It is important to note that the soil’s resistance to penetration depends on the undrained shear strength that is active at the time of penetration. The pipe-laying process inevitably causes cyclic vertical and horizontal motions at the touch down point which result in partial to full remolding of the soil. There are also stress concentrations at the touch down point due to the shape of the pipeline catenary. The influence of these effects is to increase the amount of embedment to values that are higher than would be expected based solely on the static self-weight of the pipeline and the undisturbed strength of the soil.

In order to obtain realistic embedment values, calculations may be made using one of two accepted modifications: (i) use of undisturbed undrained soil shear strengths combined with an appropriate dynamic embedment factor applied to the submerged pipe weight (Bruton et al., 2009) or (ii) use of the remolded undrained shear strength without increasing the weight of the pipe. In this study, the first approach is used for the Terzaghi, Dunlap et al. (1990) and Verley and Lund (1995) methods with a dynamic embedment factor of 2. This is because these methods are essentially empirical in nature and have been calibrated to undisturbed shear strengths. The second approach, which is recommended in DNV, is used for the DNV method.

Westgate et al. (2010) compared field survey measurements taken at 1 m intervals along a 13 km long pipeline with embedment values calculated using (a) intact s_u combined with the static overstress pipe weight (b) remolded s_u combined with the static overstress weight and (c) remolded s_u combined with a dynamic analysis of the stress concentration using Orcaflex. The field measured embedment ratios (i.e. z/D) showed a distribution ranging from values as small as 0.05 to those as high as 0.55. They found that the embedment calculated using the fully remolded strength coupled with the static overstress matched the most frequently observed embedment well. They suggest that this calculation approach leads to reasonable estimates of the average embedment for the average lay condition.

2.2.1 Classical bearing capacity

At the simplest level, Terzaghi’s bearing capacity theory may be used. The embedment in this case is the depth where the required bearing width (based on the submerged weight of the pipe and the seabed soil strength) and the pipe bearing area, B are equal. This is expressed by equation (1). Typically, the undrained strength of marine clays are modelled using a linear strength profile with a small positive strength, s_{u0} , at mudline and a linear strength increment ratio Δs_u per unit depth. The entire pipe-soil system is submerged in seawater, hence, the correct weights to use for the soil and the pipeline are their respective submerged weights (γ' for soil and P per unit length of pipeline).

$$2\sqrt{z(D_o - z)} = \frac{P}{(s_{u0} + z\Delta s_u)N_c + (\gamma'z)} \quad (1)$$

It is important to note that a modification to the bearing capacity factor, N_c , is necessary when applying the bearing capacity equation shown in equation (1). Because of the round base, the ultimate bearing capacity factor is smaller for pipelines than it is for a (flat base) strip footing. Zhao et al. (2009) presented slip-line field solutions for the ultimate load capacity of submarine pipelines and found that the N_c value decreased from 5.14 at zero embedment to a minimum value of 4 at an embedment of half the diameter in

the case of a smooth pipe-soil contact surface. In order not to introduce additional complexity into equation (1) and still remain on the conservative side, a reduced value of N_c is used (i.e. 2/3 of 5.14) in this study.

2.2.2. Method proposed by Dunlap et al (1990)

Dunlap et al. (1990) conducted a series of monotonic load tests and established the following relationship for predicting pipeline embedment.

$$H = \frac{0.01573}{D^{0.7822}} \left(\frac{F}{c_u \left(\frac{v}{D} \right)^n} \right)^{1.7822} \tag{2}$$

Here F is the applied force, D is the pipe diameter, c_u is the sediment undrained shear strength, H is pipeline embedment and v is the velocity of pipe penetration and n is the visco-elastic rate constant of the sediment (taken as 0.3 for the tested soil).

2.2.3 Method proposed by Verley and Lund (1995)

The pipe soil model proposed by Verley and Lund (1995) for predicting the initial penetration of a pipeline uses the non-dimensional parameters S and G calculated using the pipe outer diameter, D , the undrained shear strength of soil, s_u , and the soil submerged unit weight, γ_s . and the contact force, F_c between the pipe and soil. The expression is shown below.

$$\left(\frac{z}{D} \right)_{init} = 0.0071(SG^{0.3})^{3.2} + 0.062(SG^{0.3})^{0.7} \tag{3}$$

Where

$$S = \frac{F_c}{Ds_u} \quad G = \frac{s_u}{D\gamma_s} \quad F_c = P - F_l$$

The contact force, F_c , may differ from the submerged weight of the pipe if the pipe is subjected to lift forces, F_l , or stress concentrations at the point of contact. The above expression is based on an empirical fit to large and small laboratory data obtained from a number of resources. Hence, it is valid for the following range of parameters: clays with s_u ranging from 0.8 to 70 kPa, pipe diameters ranging from 0.2 to 1 m, and specific weight of pipe ranging from 1.06 to 2.5. These intervals correspond to S and G values ranging from 0.05 to 7.5 and 0.02 to 5.0 respectively. The sensitivity of G to the soil unit weight, γ_s , is low and a value of 18 kN/m³ may be used for all soils. It is noted that the database used in determining the expression for initial penetration is limited to maximum pipe penetrations, z/D , of 0.35.

2.2.4 Method in DNV Recommended Guidelines

For a pipe pushed vertically into the soil, the embedment depth is the depth where the pipe contact force is in equilibrium with the bearing capacity of the seabed soil. DNV recommended practice DNVGL-RP-F114 (2017) describes two models for the calculation of this embedment which occurs under undrained loading conditions. Both are stated to give comparable results. In Model 2, the vertical penetration resistance (including depth effects), Q_v , is calculated as shown by equation (4).

$$Q_v = \left\{ \min \left[6 \left(\frac{z}{D} \right)^{0.25} ; 3.4 \left(\frac{10z}{D} \right)^{0.5} \right] + 1.5 \frac{\gamma' A_{bm}}{Ds_u} \right\} Ds_u \tag{4}$$

Here s_u is the soil undrained shear strength at the pipe invert (and therefore is a function of z); D is the pipe outside diameter including coating; z is the pipe embedment; γ' is the soil submerged unit weight and A_{bm} is the area of the pipe segment which lies below mudline and is a function of z as shown by equation (5).

$$A_{bm} = \arcsin(B/D) \frac{D^2}{4} - \frac{BD}{4} \cos(\arcsin(B/D)) \quad \text{for } z < D/2 \tag{5}$$

$$A_{bm} = \pi D^2/8 + D(z - D/2) \quad \text{for } z \geq D/2$$

The DNV method is not empirically derived. It accounts for a number of physical phenomenon observed around pipelines. The first term represents the soil resistance to pipe penetration. As the pipeline embeds, the buoyancy of the soft clay reduces the weight of the pipe with higher reductions at higher embedment values. The second term in equation (4) accounts for this reduction in vertical load by adding the term $\gamma' A_{bm}$ to the soil resistance. As the seabed clay is displaced, a certain amount of soil heave occurs

along the outer edge of the pipeline, adding to the nominal embedment. The effect of this heave is to increase the buoyancy of the pipe by about 50% (based on best-fit numerical analysis) (Merifield et al., 2008). Model 2 accounts for the effect of heave by applying heave factor of 1.5 to the term $\gamma'A_{bm}$ in equation (4). It is noted that at very high embedment ratios ($z/D > 0.5$) equation (4) may underestimate the penetration resistance. In those cases, alternative bearing capacity factors may be found in Martin and White (2012).

3. Results

The embedment results from the four methods used are summarized in Table 3. The Terzaghi bearing capacity solution gives the smallest embedment value for all cases. Although, the pipe weight was increased, this method inherently does not account for dynamic effects in any manner. The Dunlap et al (1990) and Verley and Lund (1995) methods which are empirical in nature and which have been calibrated by lab and field observations, result in higher, more reasonable embedment values. Both of these methods give reasonably close estimates. The DNV method gives embedments lower than the empirical methods for the higher shear strength profile, similar values for the average strength profile and the highest values for the lower strength profile.

Table 3. Pipeline Embedment Results

Pipe ID	Subm. Pipe Weight, P (N/m)	Outer Diam., D (m)	Soil Strength Profile	Norm. Vert. Load	Embedment, cm - % D			
					Terzaghi	Dunlap et. al (1990)	Verley & Lund (1995)	DNVGL-RP-F114 (2017)
1	588	0.413	High	0.194	2.63 – 6.4	5.32 – 12.9	4.94 – 12.0	3.17 – 7.7
			Average	0.232	3.71 – 9.0	6.72 – 16.3	6.08 – 14.7	5.05 – 12.2
			Low	0.303	6.23 – 15.1	9.31 – 22.6	8.61 – 20.9	9.53 – 23.1
2	680	0.330	High	0.337	3.81 – 11.6	6.55 – 19.9	6.90 – 20.9	5.02 – 15.2
			Average	0.404	5.19 – 15.7	8.06 – 24.4	8.64 – 26.2	7.94 – 24.1
			Low	0.535	8.30 – 25.2	11.32 – 34.3	12.15 – 36.8	13.17 – 39.9

Use of remolded shear strength in the three older methods are not appropriate since they are empirical in nature and have been calibrated to observed embedment using intact strength. The DNV method which takes into consideration the influence of numerous mechanisms and which is essentially deterministic in nature, is able to better accommodate for remolding of the soil.

The DNV method produces a wider range of embedment ratios for the three soil profiles used. For Pipe 1 the embedment ranges from 7.7 % to 23.1% depending on the soil strength. This more closely resembles the wide spread of embedment observed in the field.

In order to compare embedment results for different pipe sizes and soil strengths the static bearing pressure (weight of pipe divided by its diameter) and the normalized vertical load may be used. The pipe bearing pressures are shown in Table 1. The normalized vertical load is the submerged empty weight of the pipeline divided by its diameter and the shear strength of the soil at a depth of one diameter, s_{u1D} . It is a dimensionless parameter and the calculated values are shown in Table 3 for each of the cases considered. Figure 1 shows embedment with respect to the pipe bearing pressure. In this figure results are plotted using solid lines for data obtained using the high strength profile, large dashed lines for those obtained using the average strength profile and small dashed lines for those obtained using the low strength profile. It can be seen that the chosen strength profile has a very significant impact on the range of embedment values obtained. As expected higher strengths result in lower embedment. The influence of the analysis method chosen can also be observed: (1) the static embedment (as calculated using classical bearing capacity analysis) consistently gives the lowest embedment and (2) the deterministic based DNVGL method produces increasingly higher embedment (as compared to the empirical based methods) as the bearing pressure increases and the soil strength decreases.

Figure 2 shows embedment versus the normalized vertical load. Use of the normalized vertical load allows for convenience in comparing different combinations (or categories) of soil strength and pipe weight. It is noted however that it does not necessarily reflect the vertical loads used in the calculations since (i) in the empirical methods a dynamic embedment factor of 2 is applied and (ii) in the DNVGL method the remolded shear strengths are used instead of the undisturbed values.

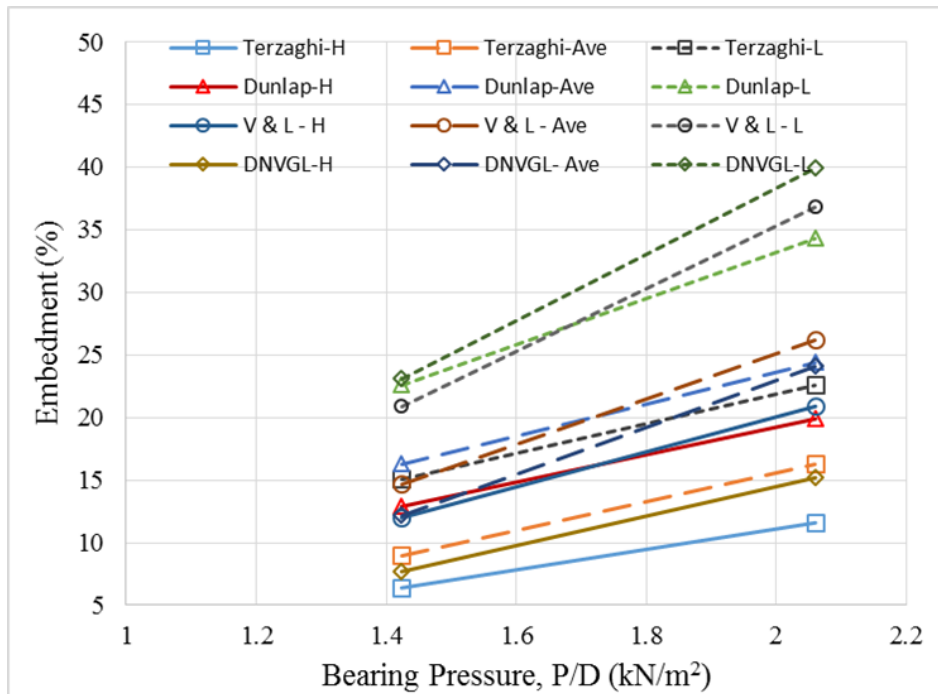


Figure 1. Embedment versus Bearing Pressure

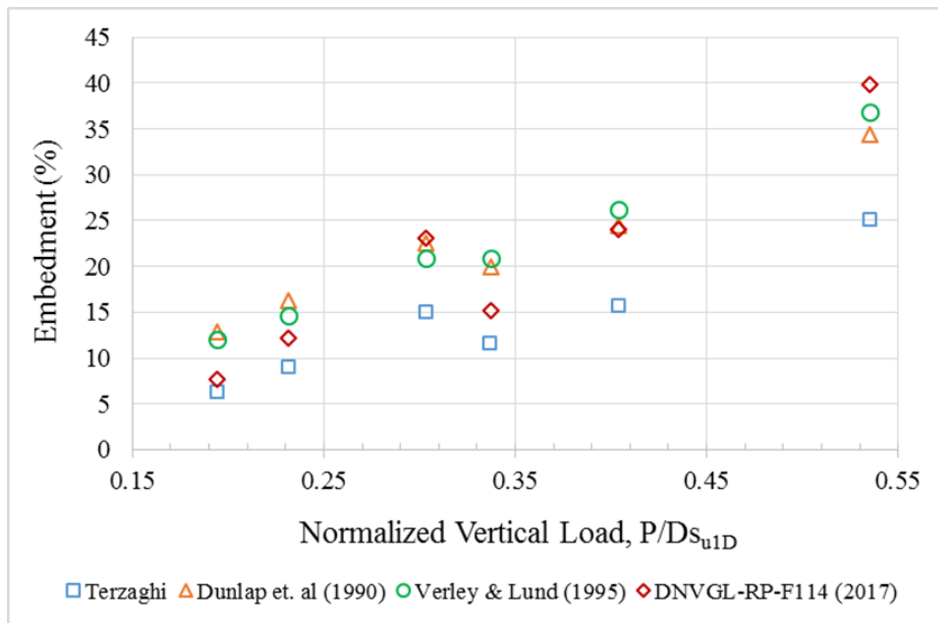


Figure 2. Embedment versus Normalized Vertical Load

4. Conclusions

Calculation of pipeline embedment using classical bearing capacity equations result in embedment values that are significantly lower than those observed in the field. Hence, other models to estimate embedment have been developed over the years. In this study pipeline embedment values were calculated using four different methods commonly used in the oil and gas industry. Two representative pipe cross-sections and three soil strength profiles were used for this comparison. The empirically derived equations and the method recommended by DNV gave similar embedment values for the average shear strength profile. The DNV method gives lower embedment values for higher shear strength profiles and higher embedment values for lower strength profiles. The DNV method also produces a larger range of embedment values for a given set of soil strength profiles.

References

- AGA/PRC. (1993). Submarine Pipeline On-Bottom Stability Vol 1 Analysis and Design Guidelines. Report PR-178-9333: American Gas Association.
- Allen, D.W., Lammert, W.F. & Hale, J.R. (1989). Submarine Pipeline On-Bottom Stability: Recent AGA Research, OTC#6055. *Proc. of the 21st Offshore Technology Conf.* Houston, Texas: SPE.
- Bruton, D. A. S., White, D. J., Langford, T. and Hill, A. J. (2009). Techniques for assessment of pipe/soil interaction forces for future deepwater developments. OTC#20096. *Proc. of the Offshore Technology Conf.* Houston, Texas: SPE.
- Det Norske Veritas. (2017). *Recommended Practice, Pipe-soil Interaction for Submarine Pipelines*. DNVGL-RP-F114: Norway.
- Dunlap, W.A., Bhojanala, R.P. & Morris, D.V. (1990). Burial of Vertically Loaded Offshore Pipelines in Weak Sediments. OTC#6375. *Proc. of the 22nd Offshore Technology Conf.* May 7-10. Houston, Texas: SPE.
- Hale, J.R., Lammert, W.F. & Jacobsen, V. (1989). Improved Basis for Static Stability Analysis and Design of Marine Pipelines. OTC #6059. *Proc. of the 21st Offshore Technology Conf.* Houston, Texas: SPE.
- Martin, C. M. & White, D. J. (2012). Limit analysis of the undrained bearing capacity of offshore pipelines. *Geotechnique*, 62(9), 847-863. [dx.doi.org/10.1680/geot.12.OG.016](https://doi.org/10.1680/geot.12.OG.016)
- Murff, J.D., Wagner, D.A., & Randolph, M.F. (1989). Pipe Penetration in Cohesive Soil. *Geotechnique*, 39(2), 213-229.
- Randolph, M. F. & White, D. J. (2008). Pipeline Embedment in Deep Water: Processes and Quantitative Assessment. OTC #19128. *Proc. of the Offshore Technology Conf.*, 5-8 May, Houston, Texas: SPE.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Verley, R. & Lund, K. M. (1995). A Soil Resistance Model for Pipelines Placed on Clay Soils. *ASME. J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. V, 225-232.
- Wagner, D.A., Murff, J.D., Brennodden, H. & Sveggen, O. (1987). Pipe-Soil Interaction Model. OTC#5504. *Proc. of the 19th Offshore Technology Conf.* Houston, Texas: SPE.
- Westgate, Z.J., White, D.J., Randolph, M. F. and Brunning, P. (2010). Pipeline Laying and Embedment in Soft Fine-Grained Soils: Field Observations and Numerical Simulations. OTC#20407. *Proc. of the Offshore Technology Conf.*, Houston, Texas: SPE.
- White, D. J., Westgate, Z. J., Ballard, J.-C., de Brier, C. and Bransby, M. F. (2015). Best Practice Geotechnical Characterization and Pipe-Soil Interaction Analysis for HPHT Pipeline Design. OTC#26026-MS. *Proc. of the Offshore Technology Conf.*, 4-7 May, Houston, Texas: SPE.
- White, D. J., Clukey, E. C., Boylan, N. P., Bransby, M. F., Zakeri, A., Hill, A. J. and Jaeck, C. (2017). The State of Knowledge of Pipe-Soil Interaction for On-Bottom Pipeline Design. OTC-27623-MS. *Proc. of the Offshore Technology Conf.* 1-4 May. Houston, Texas: SPE.
- Wolfram, W.R., Getz, J.R. & Verley, R.L.P. (1987). PIPESTAB Project: Improved Design Basis for Submarine Pipeline Stability. OTC#5501. *Proc. of the 19th Offshore Technology Conf.* Houston, Texas: SPE.
- Zhao, B., Gao, F., Liu, J. & Wu, Y. (2009). Vertical Bearing Capacity of a Partially-Embedded Pipeline on Tresca Soils. *Proc. International Offshore and Polar Engineering Conf.* June 21-26. Osaka, Japan, 469-473.



Karbon Nanotüp takviyeli ZA-27 Esaslı Kompozitlerde Karbon Nanotüp Takviye Oranının Mikroyapı Ve Bazı Mekanik Özelliklere Etkisi

Effect of Carbon Nanotube Reinforcement Ratio on Microstructure and Some Mechanical Properties in ZA-27 Based Composites Reinforced with Carbon Nanotube

Muharrem Pul

Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 04/11/2019

Kabul / Accepted: 11/01/2020

Çevrimiçi Basım / Published Online: 13/01/2020

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Son yıllarda kullanılmakta olan mevcut mühendislik malzemeleri gelişen teknolojinin ihtiyaçları karşısında yetersiz kalmaktadır. Bu sorunu çözmek için daha üstün niteliklerde malzeme araştırmaları geliştirilerek kompozit malzemeler ortaya çıkmıştır. Kompozitlerin en önemli özelliği hafif, uzun ömürlü ve yüksek dayanımlı malzemeler olmasıdır. Bu üstün özelliklerinden dolayı tüm endüstri alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Son zamanlarda bu kompozit malzemelerin arasına, nano katkı daha üstün özellikteki kompozitler katılmıştır. Bu çalışmada çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) katkılı, ZA-27 (çinko-alüminyum) esaslı nano kompozitler toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. ZA-27 alaşımı içerisine farklı oranlarda (%0,5 - %1,0 - %1,5 - %3,0) MWCNT takviye edilmiştir. Üretilen ZA-27 nano katkılı kompozitlerin, taramalı elektron mikroskopunda (SEM) mikroyapıları incelenmiştir. Bazı mekanik özellikleri tespit etmek üzere; yoğunlukları ölçülerek sertlik ve çapraz kırılma deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen verilere göre nano kompozit malzemelerin içerisindeki nano takviye miktarlarının, kompozitin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

ZA-27, Karbon Nanotüp, Mikroyapı, Sertlik, Çapraz Kırılma

Abstract

Classical engineering materials used in recent years are inadequate against the needs of developing technology. In order to solve this problem, advanced material researches were developed and composite materials emerged. The most important feature of composites is that they are light, long lasting and high strength materials. Because of these superior properties, they are widely used in all industrial areas. Recently, among these composite materials, more nano-doped composites have been added. In this study, multi-walled carbon nanotube (MWCNT) doped, ZA-27 (zinc-aluminum) based nano composites were produced by powder metallurgy method. ZA-27 alloy in different proportions (0.5% - 1.0% - 1.5% - 3.0%) MWCNT are reinforced. The microstructures of the produced ZA-27 nano doped composites were investigated under scanning electron microscope (SEM). In order to determine some mechanical properties; density and hardness and cross fracture tests were performed. According to the data obtained from the experiments, the effect of the amount of nano-reinforcements in the nano-composite materials on the mechanical properties of the composite was evaluated.

Key Words

ZA-27, Carbon Nanotube, Microstructure, Hardness, Transverse Rupture

1. Giriş

Son yıllarda tüm endüstri alanlarında kompozit malzemelerin kullanımı giderek artış göstermektedir. Bu kompozit malzemelerin bir çeşidi olan metal matrisli kompozitler (MMK) üzerine yapılan araştırmalar da giderek yoğunlaşmaktadır. Yapılan çalışmalarda ağırlıklı olarak hafif metal esaslı alüminyum, magnezyum alaşımları çoğunluğu oluşturmaktadır. Ancak, son zamanlarda çinko matrisli seramik takviyeli kompozitlerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi birçok araştırmacı tarafından ilgi duyulan bir çalışma alanı olmuştur. Çinko esaslı alaşımlar ergime sıcaklıklarının düşük olması ve ucuz olmaları nedeniyle matris malzemesi olarak oldukça kullanışlıdır. Ayrıca bu alaşımlar mükemmel tribolojik özelliklere sahiptirler. Matris malzemesi olarak kullanılan çinko esaslı alaşımlar arasında, ZA-27 alaşımı oldukça popülerdir (Çelebi ve ark. 2015). ZA-27, çinko-alüminyum alaşımı seri üretime uygunluğu, yüksek korozyon direnci, düşük erime sıcaklığı ve gösterdiği üstün işlenebilirlik özellikleri sebebiyle başta otomotiv, yapı sektörü olmak üzere, spor malzemeleri, oyuncak, hırdavat, dekorasyon, beyaz eşya vb. alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. ZA-27 alaşımının diğer bir adı da ZAMAK'tır. ZA-27 alaşımı, MMK malzemelerin geliştirilmesinde esas malzeme olarak kullanılmakta ve bu kullanım sahası her geçen gün büyümektedir. Kompozit malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesinde esas malzeme kadar takviye elemanı da etkilidir. Takviye elemanı, kompozit üzerine gelen yükün büyük bir bölümünü taşımaktadır. Bu tür kompozitlerin üretilmesinde kullanılan takviye elemanları içerisinde nano malzemeler giderek yaygınlaşmaktadır. Bu malzemeler içerisinde nano boyuta B_4C , SiC , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , TiB_2 , TiC , karbon nano tüpler (CNT) ve nano grafen (GNP) gibi malzemeler ön plana çıkmaktadır. Günümüzde daha ekonomik, daha hafif ve gelişmiş mekanik özellikler sağlayan bu tür kompozitler üzerine yapılan araştırmalar hız kazanmıştır. Karbon nanotüpler (CNT), 1990'lı yılların başındaki keşiflerinden sonra olağanüstü özelliklerinin fark edilmesi ile yoğun biçimde araştırılmaya başlanmış ve ilerleyen zamanla bu ilgi, söz konusu malzemenin özellikle nanobilim olmak üzere birçok farklı sahada bir "fenomene" dönüşmesine yol açmıştır. Hem uygulamalı hem de kuramsal birçok çalışmada karbon nanotüpler, nanoteknoloji için bir "model sistem" olmuştur (Pul 2019). Karbon alanında yapılan araştırmalar, 1991'de Iijima tarafından karbon nanotüpleri (CNT) keşfi ile devrim yaratmıştır. Deneyler ve simülasyonlar CNT'lerin karbon elyaflarına göre olağanüstü mekanik özelliklere sahiptir. CNT'lerin 1000 GPa'ya kadar sertlik, 100 GPa'lık mukavemet ve $6000 W m^{-1} K^{-1}$ kadar ısı iletkenlik değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu araştırmalar, CNT'lerin, insanlığın bildiği, olağanüstü özelliklere sahip en güçlü elyaf olduğunu göstermektedir (Bakshi ve ark. 2010).

Metal matrisli kompozitler alanında yapılan çalışmalarda genellikle alüminyum esaslı nano kompozit çalışmaları oldukça fazla sayıda yapılmıştır. Ancak çinko esaslı bir alaşım olan ZA-27 esaslı nano kompozitler üzerine yeterince yerli ve yabancı çalışma literatürde yer almamaktadır. Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile ZA-27 alaşımı içerisine farklı oranlarda MWCNT takviye edilerek nano kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapıları incelenerek yoğunlukları ölçülmüştür. Ayrıca bazı mekanik özelliklerini belirlemek üzere sertlik ölçümleri ve çapraz kırılma deneyleri yapılmıştır. Deney ve ölçmelerden elde edilen veriler mikroyapı görüntüleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Bu çalışma ile ZA-27 alaşımının mekanik özellikleri üzerine, farklı miktarlardaki nano grafen katkısının etkileri ve bu katkı miktarlarının optimizasyonu amaçlanmıştır.

2. Materyal Ve Yöntem

Bu çalışmada esas malzeme (matris malzemesi) olarak seçilen ZA-27 (çinko-alüminyum) alaşımına ait teknik özellikler Tablo 1'te verilmektedir.

Tablo 1. ZA-27 alaşımının teknik özellikleri

% Al	% Mg	% Cu	% Fe	% Pb	% Zn
25,5-28,0	0,01-0,02	2,0-2,5	0,075	0,006	Kalan
Yoğunluk g/cm ³	Erime Noktası °C	Sertlik Brinell	Çekme Dayn. MPa	Isıl İletkenlik W/mK	Elekt. İletk. S/m
5,0	376-484	105-125	421	123	1,72

Kompozitlerin hazırlanmasında takviye elemanı olarak kullanılan çok duvarlı karbon nanotüpe (MWCNT) ait bazı teknik özellikler ve SEM görüntüsü Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. MWCNT teknik özellikleri

Safılık, %	Dış çap, nm	İç çap, nm	Uzunluk, µm	Renk	Elektrik İlet., S/m	Isıl ilet., W/mK	SSA, m ² /g
92	8-10	5-8	1-3	Siyah	9800	$3,0 \times 10^3$	240

Ağırlıkça %0,5 - %1,0 - %1,5 ve %3,0 MWCNT olmak üzere dört farklı oranda nano malzeme katkılı ZA-27 nano kompozitin üretilmesi planlanmıştır. Kompozitlerin hazırlanmasında ilk aşamada, hesaplanan ağırlık oranlarındaki ZA-27 ve MWCNT nano malzemeler bilyalı değirmende 90 min süreyle 450 rpm devirle karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiştir. Karıştırma işlemi sırasında 8 mm çaplı çelik bilyeler kullanılmıştır. Karıştırmadaki malzeme/bilye ağırlık oranı 5/1 olarak seçilmiştir. Presleme sonrasında ve nano kompozit numunelerin kalıptan rahat çıkabilmesi için kaymayı artırmak ve sürtünmeyi azaltmak amacıyla karışım içerisine % 0,5 oranında yalayıcı özelliği olan Çinko Stearat ilave edilmiştir. Karıştırma işleminden sonra elde edilen kompozit karışımlar ayrı ayrı işaretlenerek sıkıştırma işlemine hazır hale gelmiştir. Dört farklı takviye miktarına göre hazırlanan ZA-27+MWCNT toz karışımlar çelik kalıp içerisinde 500 MPa basınç altında hidrolik preste sıkıştırılmıştır.

Sıkıştırma işlemi tamamlanan nano kompozit numuneler, ısıtma fırınında sinterleme ısıtma işlemine tabi tutulmuşlardır. Sinterleme işleminde, fırın sıcaklığı, 40-45 dakikada kademeli olarak 400°C, 425°C ve 450°C'lere çıkartılmış ve bu sıcaklıklarda 90 dakika boyunca sinterleme yapılarak sinterleme işlemleri tamamlanmıştır. Daha sonra ısıtma fırını kendi halinde soğumaya bırakılarak soğuyan nano kompozit numuneler fırın içerisinden alınmıştır. Şekil 1'deki fotoğrafta sinterleme işlemi tamamlanan kompozit numunelere ait görüntü verilmiştir.



Şekil 1. Sinterleme işlemi tamamlanmış nano kompozit numuneler

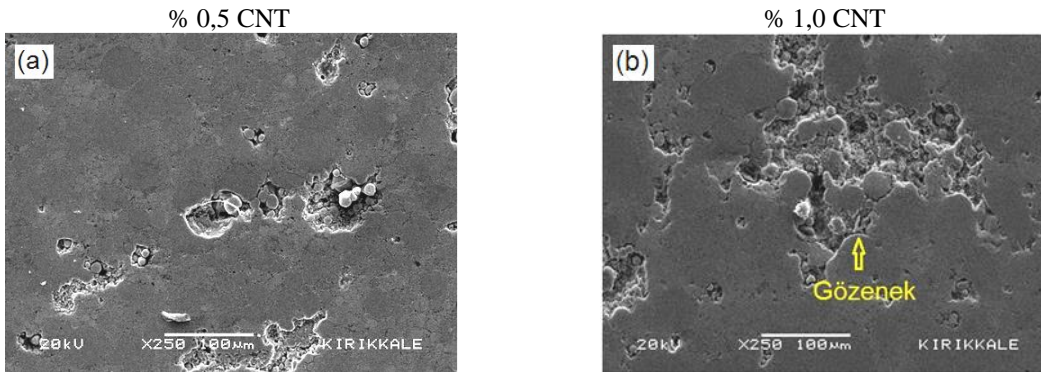
Sinterleme işleminden sonra nano kompozit malzemelerin üretim süreci tamamlanarak mikroyapı incelemeleri ve mekanik deneyler aşamasına geçilmiştir. İlk olarak kompozit numunelerin mikroyapılarını incelemek amacıyla yüzey hazırlama işlemi yapılmıştır. Yüzey hazırlama işleminde sırasıyla 400, 800 ve 1200 mesh zımparalama işlemi yapılmış ve son olarak 3 mikronluk Al_2O_3 sıvı solüsyon kullanılarak parlatma çuhası ile yüzeyler hazırlanmıştır. Son olarak parlatılmış yüzeyler etil alkol ile yıkanarak yüzey hazırlama işlemleri tamamlanmıştır. Kompozit numunelerin mikroyapı görüntüleri, SEM mikroskobu vasıtasıyla çekilmiştir. Daha sonra üretilen nano takviyeli kompozit numunelerin gözenek oranını belirleyebilmek amacıyla arşimet prensibine göre yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Mekanik deneylerin ilk aşamasında nano kompozitlerin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri Brinell yöntemine göre 15,625 kg yüklemeye ile 2,5 mm'lik ölçme probuyla mikro sertlik ölçme cihazında yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde, her takviye oranına ait bir adet numune üzerinde 5 farklı noktadan ölçüm yapılarak ortalama değer hesaplanmıştır. Mekanik deneylerin ikinci aşamasında çapraz kırılma (üç nokta eğme) deneyleri yapılmıştır. Deneyler 0,05 kN/sn yüklemeye hızıyla 5 ton kapasiteli hidrolik eğme presinde gerçekleştirilmiştir. Çapraz kırılma deneyleri ve ASTM-B 528-05 (2008) standardına uygun olarak, her takviye hacim oranı için üçer adet yapılarak ortalama değer hesaplanmıştır.

Yapılan tüm deney ve ölçümlerden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, nano kompozit numunelerin bazı mekanik özellikleri incelenerek, ZA-27 alaşımı içerisindeki nano malzeme katkı oranlarının optimum miktarlarının belirlenmesine çalışılmıştır. Ayrıca, katkısız ticari ZA-27 malzeme ile karşılaştırılarak, MWCNT nano malzemelerinin katkısının ZA-27 alaşımına kazandırdığı özellikler yorumlanmıştır. Metin içerisinde bundan sonra MWCNT ifadesi yerine CNT kısaltması kullanılmıştır.

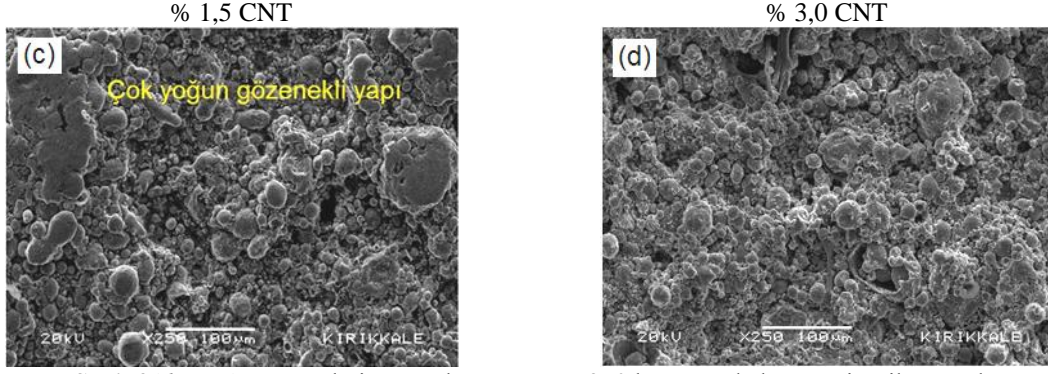
3.Sonuçlar ve Tartışma

3.1. CNT Takviye Oranlarına Göre Mikroyapıların Değerlendirilmesi

CNT takviyeli ZA-27 matrisli kompozitlerin, takviye oranlarına göre mikroyapılarını değerlendirmek amacıyla çekilmiş elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir.



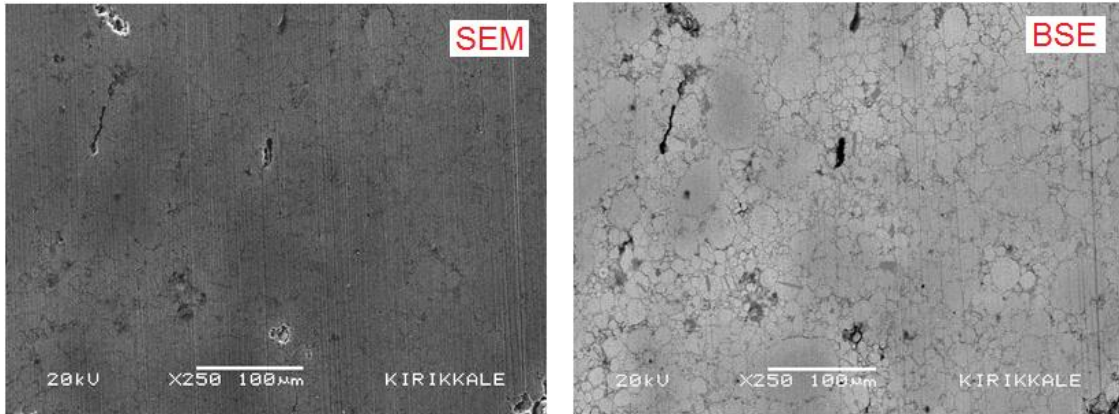
Şekil 2. CNT takviye oranlarına göre, ×250 büyütmede kompozit mikroyapılar



Şekil 2(*devam*). CNT takviye oranlarına göre, $\times 250$ büyütmede kompozit mikroyapılar

Şekil 2'deki görüntülere topluca bakıldığında ilk göze çarpan tüm numunelerde gözenekli mikroyapının oluşmasıdır. CNT takviye oranının artışıyla gözenek oranlarının artış gösterdiği görülmektedir Şekil 2 (c) ve (d). CNT miktarının artmasıyla, mikroyapıdaki homojen dağılım ve ZA-27 tanecikleri arasındaki bağ oluşumu olumsuz etkilenmiştir. Sinterleme işlemiyle birbirine bağlanamayan ZA-27 tanecikleri arasında topaklanma eğilimi ortaya çıkmıştır. Kompozit karışımların hazırlanmasında; döner tamburlu karıştırıcı kullanılarak, 300 rpm hızda 120 dakika süre ile ZA-27 tozları ile takviye malzemesi nano CNT parçacıkları karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen mikroyapılara bakıldığında, yapılan karıştırma işleminin yöntemi, süresi ve hızının tam anlamıyla yeterli olmadığını söyleyebiliriz. Bu tür nano malzeme katkıli kompozit yapıların elde edilmesinde ultrasonik veya manyetik karıştırma işlemlerinin uygulanarak mikroyapı sonuçlarının karşılaştırılması ve mekanik yöntemle yapılan karıştırmaya göre mukayese edilmesi tavsiye edilebilir.

Nano katkısız ZA-27 numuneler preste sıkıştırma işleminden sonra ergime derecesi dikkate alınarak, 400°C 'de ve diğer kompozit numunelerde olduğu sürelerde sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. CNT nano takviye malzemelerinin kompozit yapı üzerindeki tesirini daha iyi değerlendirebilmek amacıyla takviyesiz %100 ZA-27 malzemeden oluşturulmuş numuneye ait SEM görüntüsü ve tane sınırlarının daha belirgin görüldüğü Back-Scattered-Electron (BSE) görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir.



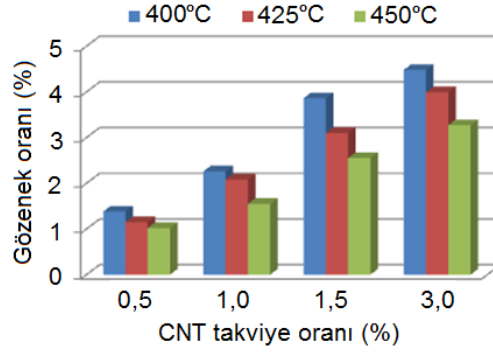
Şekil 3. Nano takviyesiz %100 ZA-27, $\times 250$ büyütmede mikroyapılar

Şekil 3'teki görüntüye bakıldığında yukarıda yapılan yorumları destekler nitelikte bir mikroyapı ile karşılaşmaktadır. Kompozit karışımların hazırlanmasında uygulanan karıştırma yöntemi ve işlem parametrelerinin çok yeterli olmadığını ve azda olsa gözenek oluşumuna sebep olduğu söyleyebiliriz. Ancak bu gözenek miktarı CNT nano malzeme katkıli kompozit numuneler ile kıyaslanmayacak oranda düşüktür. Nano malzeme katkısiz %100 ZA-27 toz malzemeden oluşturulmuş numunenin mikroyapısı incelendiğinde toz metalurjisi yönteminden beklenen özellikte bir yapı meydana getirildiği söyleyebiliriz. Ancak az miktarda da oluşan gözeneklerin bertaraf edilebilmesi ve daha mükemmel bir mikro yapıya ulaşmak için, toz metalurjisi işlemi önemli parametrelerinden olan sıkıştırma basıncı, ve sinterleme ısısı işleminde ayrıca değerlendirilmesi uygun olacaktır.

Yukarıda yer alan nano malzeme katkısiz ZA-27 numunenin mikroyapısına bakıldığında ve yapı içerisindeki gözenekler dikkate alınmadan değerlendirme yapıldığında, 400°C 'lik sinterleme sıcaklığı ve uygulanan 90 dakika sinterleme süresinin uygun olduğu söyleyebiliriz. Zira SEM ve BSE görüntüsünden de anlaşılacağı üzere ZA-27 tanecikleri arasında beklene boyun ve bağ oluşumunun gerçekleştiği görülmektedir. Bu sonuçlara göre, nano malzeme katkıli kompozit numunelerin üretim parametreleri olarak seçilen 500 MPa sıkıştırma basıncı, 90 dakika sinterleme süresi ve 400°C , 425°C ve 450°C sinterleme sıcaklıklarının gözden geçirilerek bundan sonraki çalışmalarda değerlendirilmesi tavsiye edilmektedir.

3.2. Gözenekliliğin (Yoğunlukların) İncelenmesi

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen CNT katkıli kompozitlerin Arşimet prensibi kullanılarak ölçülen gözenek oranlarını gösteren grafik Şekil 4'te verilmiştir.



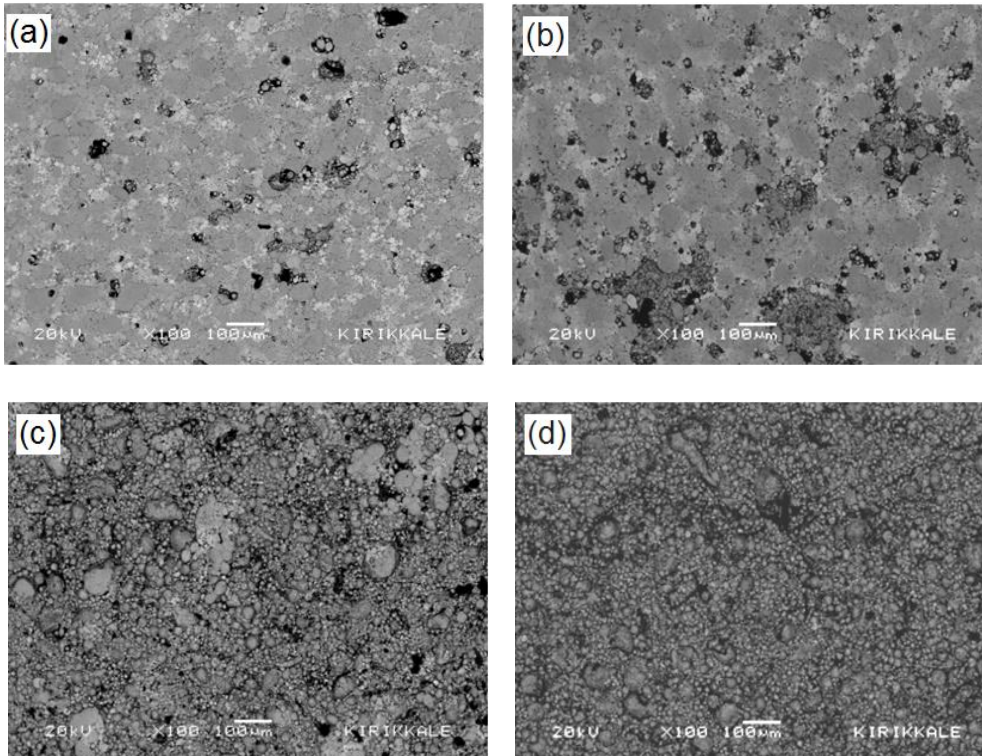
Şekil 4. CNT /ZA-27 kompozitlerin gözenek miktarları

Şekil 4'teki grafiklere bakıldığında ilk etapta nano CNT takviye oranlarının artışına bağlı olarak gözenek miktarlarının yükselmekte olduğu görülmektedir. Yapılan farklı çalışmalarda benzer sonuçlar ifade edilmiştir (Çelebi ve ark. 2015), (Dalmış ve ark. 2016), (Sayed ve ark. 2012), (Saheb ve ark. 2012). Takviye elemanının nano boyutta olması, karıştırma işleminde ZA-27 matris içerisine nano malzemelerin homojen olarak dağılmasını zorlaştırmıştır. Karıştırma işleminde kullanılan mekanik yöntemin çok küçük boyuttaki nano parçacıkların birbirinden ayrılarak matris malzemesi ZA-27 tozları içerisinde topaklanmadan ve homojen olarak dağılmasında yeterli olamamıştır. CNT takviye oranlarının artmasıyla bu durum daha da zorlaşarak kompozit yapı içerisindeki gözeneklilik miktarlarını arttırmıştır. Benzer sonuçlar literatürde yer almıştır (Zhou ve ark. 2017) (Şenel ve ark. 2017). Ayrıca Şekil 2 (a), (b), (c), (d)'de verilen mikroyapı görüntülerine bakıldığında takviye oranı ile gözeneklilik arasındaki ilişki açık olarak gözlenebilmektedir.

İkinci genel durum ise, tüm takviye oranlarında sinterleme sıcaklığının artmasıyla porozite oranlarının önemli ölçüde düşme eğilimidir. Sinter sıcaklığının yükselmesi kompozit yapının yoğunluğu artırarak gözene miktarının azalmasına katkı sağlamıştır. Literatürde benzer bir sonuç yer almaktadır (Islak ve ark. 2014), (Garg ve ark. 2016), (Saheb ve ark. 2012). Bu malzeme davranışı beklenen bir durum olmakla birlikte, özellikle sinterleme sıcaklığının 425°C'den 450°C'ye çıkmasıyla porozite değerlerindeki azalma, 400°C'den 425°C'ye çıkmasından daha etkili olmuştur. Bu sonuca göre sinterleme sıcaklığı 425°C'ye yükseldikten sonra, kompozit yapıda daha fazla değişime neden olmuştur. Sinterlemenin en önemli tesiri ZA-27 taneleri arasındaki boyun oluşumunu artırması ve taneler arası bağlanmayı sağlamasıdır. Yapılan yoğunluk ölçümü ve gözeneklilik hesaplamalarına göre; en düşük porozite değeri 450°C'de sinterlenmiş %0,5 nano CNT takviyeli kompozitten, en yüksek porozite değeri ise 400°C'de sinterlenmiş %3,0 nano CNT takviyeli kompozitten elde edilmiştir.

3.3.CNT Takviye Oranına Göre Mikroyapıların Değerlendirilmesi

CNT nano malzeme oranlarının kompozit yapı içerisindeki durumunu incelemek amacıyla %0,5 - %1,0 - %1,5 ve %3,0 oranlarında CNT takviyeli ve 450°C'de sinterlenmiş kompozit malzemelerin BSE görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir.

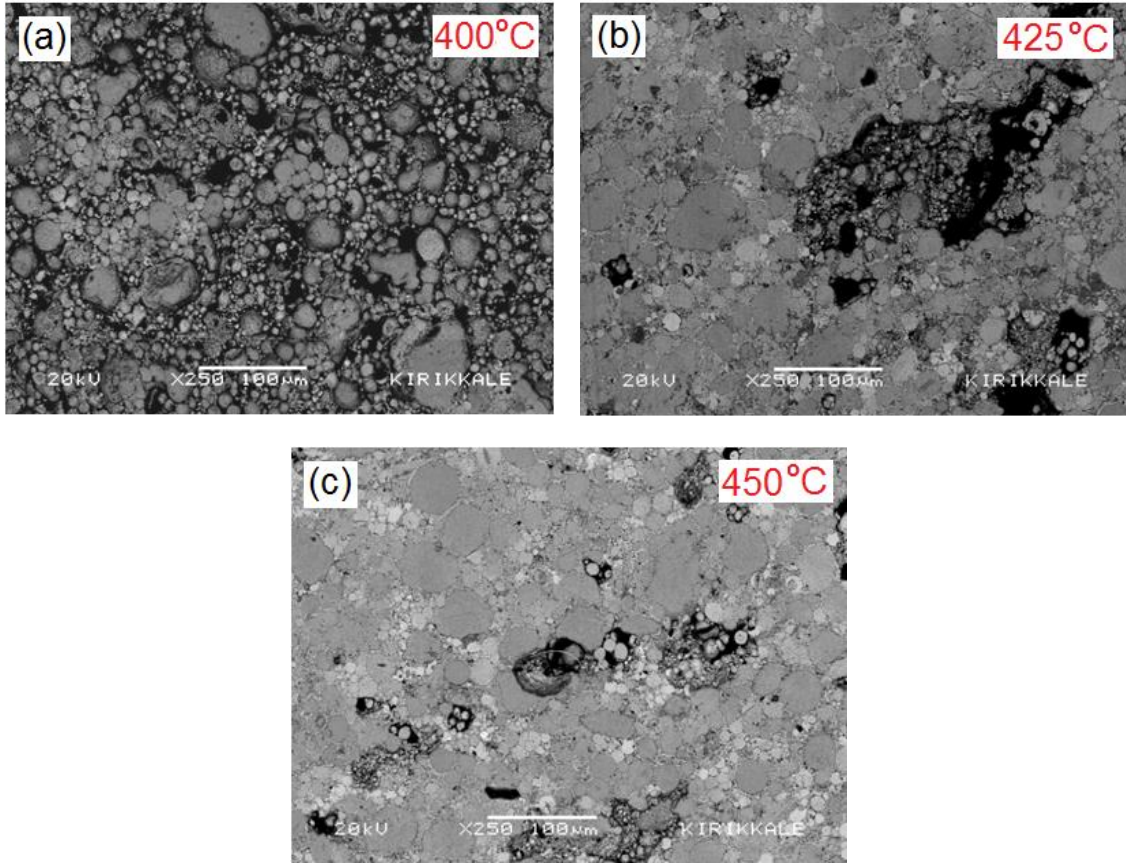


Şekil 5. 450°C'de sinterlenmiş, %0,5 (a), %1,0 (b), %1,5 (c) ve %3,0 (d) CNT takviyeli kompozit malzemelerin $\times 100$ büyütmede BSE görüntüleri

Şekil 5'teki görüntüler incelendiğinde, CNT takviye miktarının artışına bağlı olarak kompozit yapı içerisindeki gözenekliliğin artmakta olduğu çok açıkça görünmektedir. Şekil 5 (a) ile Şekil 5 (d) arasındaki mikroyapısal farklılıktan da anlaşılacağı üzere, CNT miktarının artmasıyla birlikte ZA-27 matris malzemesi taneciklerinin birbiriyle bağ oluşumu giderek zayıflamıştır. BSE görüntülerindeki koyu renkteki bölgeler kompozit yapı içerisindeki gözenekli (boşluklu) bölgeleri ifade etmektedir. Şekil 5'teki görüntülere bakıldığında CNT takviye oranının % 0,5'ten yukarıya doğru çıkmasıyla kompozit yapı içerisindeki gözenekli bölgelerinde artmakta olduğu anlaşılmaktadır. CNT nano malzemeler ZA-27 matris malzemesinin arasına yerleşerek matris malzemesinin sinterlemede arzu edilen taneler arası boyun ve bağ oluşumunu olumsuz etkilemiştir. CNT takviye malzemesinin sahip olduğu çok yüksek yüzey alanı değerlerinin (CNT=240 m²/g) ve yüzey enerjisinin sinterleme sırasında etkili olduğu ve adeta ZA-27 tanecikleri arasında bir ara yüzey oluşturarak ısı transferini azaltmış olabileceği değerlendirilmektedir.

3.4.Sinterleme Sıcaklıklarına Göre Mikroyapıların Değerlendirilmesi

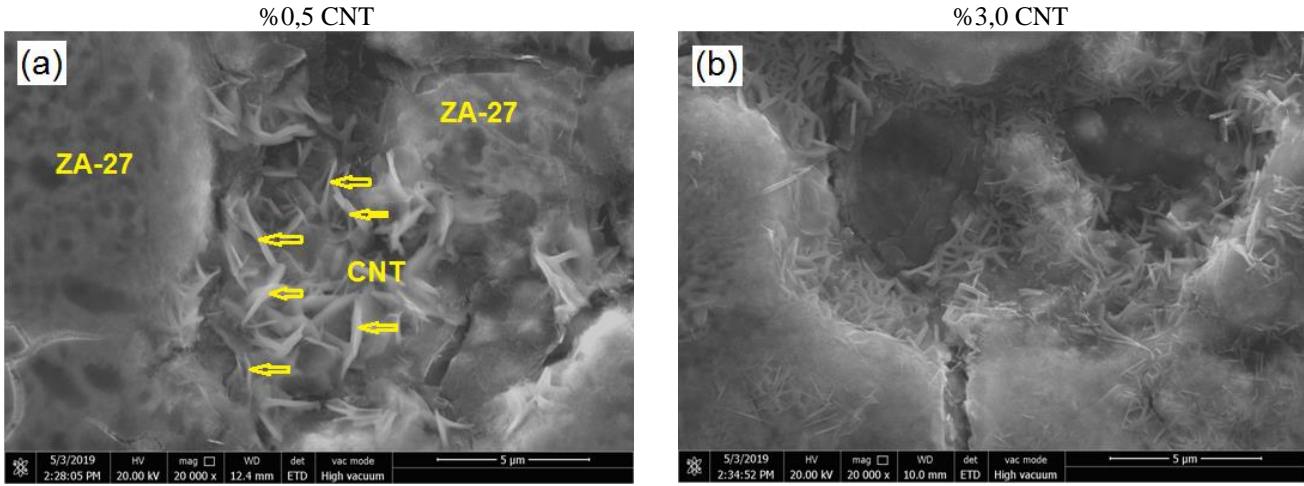
Mikroyapıların sinterleme sıcaklıklarına göre değerlendirmesine geçilmeden önce bu deneysel çalışmaya özgü özel bir durumu açıklamak uygun olacaktır. Bu çalışma literatürde az rastlanan bir sonuç ortaya koymaktadır. Matris malzemesi olan ZA-27 çinko-alüminyum alaşımının erime derecesi 484°C'dir. Toz metalurjisi ile elde edilen kompozitlerin sinterleme işlemine ilk olarak 400°C ile başlanmış ancak beklenen yapı elde edilememiştir. Daha sonra 425°C'ye çıkılarak sinterleme yapılmış olmasına rağmen yine beklenen taneler arası bağlanma meydana gelebilmiştir. Son olarak 450°C sıcaklıkta sinterleme yapılarak çalışma tamamlanmıştır. Normal şartlarda, çıkılan bu sinterleme sıcaklıklarında ana malzeme olan ZA-27'nin yumuşayarak kompozit numunelerin deforme olması beklenirken böyle olmamıştır. Bu beklenmeyen malzeme davranışının, kompozit yapı içerisine katılan CNT takviye elemanı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Sinterleme sırasında ısı işlem fırını içerisindeki sıcaklığın tamamının matris malzemesine etki yapamayıp, ısının bir kısmının nano CNT takviye malzemesi tarafından absorbe edildiği varsayılmıştır. Bu durum teknik olarak kullanılan nano malzemenin sahip olduğu çok yüksek spesifik yüzey alanı değerlerine atfedilmiştir. Yukarıdaki açıklama ve değerlendirmelerden sonra; seçilen takviye oranları içerisinde orta değer olan % 1,5 CNT takviyeli ZA-27 matrisli kompozitlerin, sinterleme sıcaklıklarına göre mikroyapılarını değerlendirmek amacıyla yine tane sınırlarının daha belirgin görüldüğü BSE görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. % 1,5 CNT takviyeli nano kompozitlerin sinterleme sıcaklıklarına göre $\times 250$ büyütmede BSE görüntüleri

Şekil 6'daki BSE görüntüleri incelendiğinde, genel olarak sinterleme sıcaklığının artışına bağlı olarak ZA-27 tanecikleri arasındaki boyun oluşumunun arttığı söylenebilir. Sinterleme sıcaklığının artışı ZA-27 taneleri arasındaki bağlanmayı olumlu etkileyerek, kompozit yapıdaki matris malzemesi ZA-27 üzerindeki gözenek oranının da azalmasına neden olmuştur. Şekil 6'daki (a), (b) ve (c) görüntülerine bakıldığında kompozit yapının giderek sıkılaştığı görülmektedir. Ancak malzeme topaklanmasının olduğu gözenekli bölgelerde sinterleme sıcaklık artışının çok etkili olmadığı söylenebilir. Topaklanmanın olduğu bölgelerdeki ZA-27 parçacıklarının çevresinde ve yüzeylerinde yoğun olarak nano takviye elemanlarının bulunduğu ve sinterleme sıcaklıklarının matris malzemesi ZA-27 içerisine tesir edemediği varsayılmaktadır. Diğer taraftan Şekil 6 (c) incelendiğinde, özellikle 450°C'de sinterlenmiş kompozit yapıdaki taneler arası bağlanmanın iyi olduğu, ZA-27 tanecikleri arasındaki ara yüzey sınır çizgilerinden anlaşılmaktadır. Bu durumda sinterleme sıcaklık artışının kompozit yapıyı olumlu

etkilemiş olduğu sonucuna varılabilir. Yapılan bu değerlendirmelerden sonra kompozit yapı içerisindeki nano malzemenin incelenebilmesi amacıyla en düşük (%0,5) ve en yüksek (%3,0) takviye oranına ait CNT katkıli kompozit numunelerden $\times 20000$ büyütmede çekilen SEM görüntüleri Şekil 7’de verilmiştir.

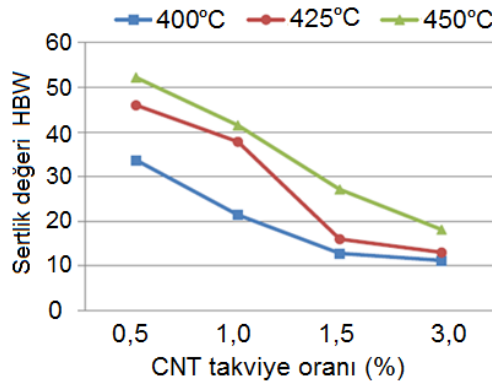


Şekil 7. Nano boyutta CNT malzemelerin görüldüğü mikroyapılar

Şekil 7’deki SEM görüntüleri incelendiğinde kompozit yapılar içerisinde CNT nano malzemeler rahatlıkla seçilebilmektedir. Özellikle Şekil 7 (b)’deki %3,0 CNT katkıli numuneye ait SEM görüntüsü dikkate incelendiğinde CNT takviye malzemesinin ZA-27 tanecikleri üzerinde yoğun olarak yer aldığı ve matris malzemesi ZA-27’yi tamamen kapladığı görülmektedir. Daha önce yapılan yorumlarda da ifade edildiği üzere nano malzemenin yüksek oranda yer aldığı numunelerde ZA-27 tanecikleri arasındaki bağ oluşumunun zayıfladığı anlaşılmaktadır. ZA-27 tanecikleri üzerinde yer alan ve tanecik yüzeyinin bir bölümünü kaplayan CNT partiküllerinin ısı iletiminin zayıflamasına neden olduğu ve böylece ZA-27 taneleri arasında sinterleme sıcaklığının etkisinin azalarak taneler arası bağlanmanın olumsuz etkilendiği varsayılmıştır.

3.5.Sertlik Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

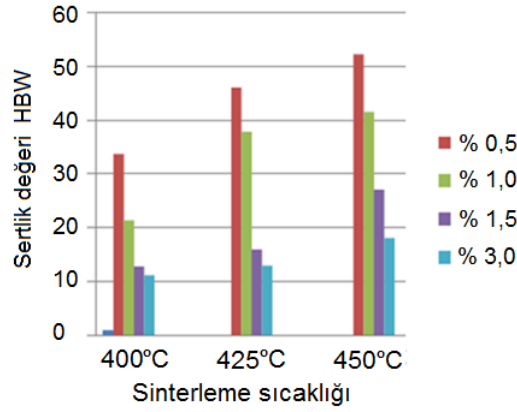
Nano katkıli ZA-27 kompozitlerin sertlik ölçümleri Brinell yöntemi kullanılarak, 15,625 kg yüklemeye ile 2,5 mm’lik ölçme probuyla cihazda yapılmıştır. CNT nano malzeme katkıli kompozitlerin sertlik ölçme sonuçlarından hesaplanan ortalama değerlere göre çizilen grafikler Şekil 8’de verilmektedir.



Şekil 8. CNT takviyeli ZA-27 nano kompozitlerin CNT oranına göre sertlik değerleri

Şekil 8’deki grafiklere bakıldığında CNT takviye oranının artmasıyla sertlik değerlerinin önemli ölçüde düştüğü genel eğilim olarak görülmektedir. Bu durum üç farklı sinterleme sıcaklığı için de geçerlidir. Katkısız saf %100 ZA-27 alaşımının sertlik değerleri 53-56 HBW arasında değişirken, kompozit numunelerde ölçülen en düşük sertlik değeri 11,2 HBW ile 400°C de sinterlenmiş %3,0 CNT katkıli numunede, en yüksek sertlik değeri ise, 450°C de sinterlenmiş %0,5 CNT katkıli numunede 52,2 HBW olarak ölçülmüştür. En düşük sertlik değerini dikkate aldığımızda, bu değer matris malzemesi ZA-27 alaşımının beşte birine tekabül etmektedir. CNT nano malzeme katkısı kompozit yapının sertlik değerini çok yüksek oranda düşürmüştür.

Özellikle %1,0 ve daha yüksek oranlardaki (%1,5 - %3,0) nano katkının sertlik değerlerini önemli ölçüde düşürdüğü görülmektedir. Nano takviye oranının %1,5 civarına çıkmasıyla katkısız ZA-27 malzemeyle arasında yarıya yakın sertlik değeri düşmesi meydana gelmiştir. Nano katkının %3,0 olduğu numunelerde sertlik ölçümleri sırasında bazı numunelerin dağılma eğilimi sergilediği ve sertlik ölçümünün çok zor yapılabildiği gözlenmiştir. Kompozit yapı içerisindeki nano katkılar ZA-27 matris malzemesi partiküllerinin birbiriyle bağ yapmasını önemli ölçüde engellemiş olduğu söylenebilir. Sinterleme sırasında meydana gelen ısının tamamının matris malzemesine etki yapamayıp nano takviye malzemeleri tarafından absorbe edilmiş olduğu değerlendirilmektedir. Bu duruma en önemli etkiyi, nano malzemelerin çok yüksek spesifik yüzey alanına sahip olmasının neden olduğu sanılmaktadır. Sinterleme sıcaklık değişimlerinin kompozit yapının sertliğine etkisini değerlendirmeye devam etmek amacıyla çizilen farklı bir grafik Şekil 9’da verilmiştir.

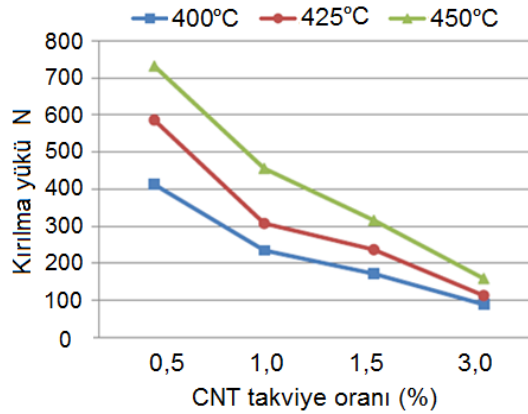


Şekil 9. CNT takviyeli ZA-27 nano kompozitlerin sinterleme sıcaklıklarına göre sertlik değerleri

Şekil 9'daki grafiklere bakıldığında; sinterleme sıcaklığının artmasıyla sertlik değerlerinin yükselme eğilimi gösterdiği ifade edilebilir. Bu durum tüm takviye oranlarında geçerlidir. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla ZA-27 tozları arasındaki bağlanma olumlu yönde etkilenmiştir. Bütün takviye oranlarında en düşük sertlik değerleri 400°C de sinterlenmiş numunelerden elde edilirken, en yüksek sertlik değerleri 450°C de sinterlenmiş nano kompozit numunelerden elde edilmiştir. Normal şartlarda ZA-27 alaşımının erime derecesi 419-484°C aralığındadır. Ancak deneysel çalışmanın ön denemelerinde 400°C sinterleme sıcaklığı kullanılarak numunenin yapısı kontrol edildiğinde sinterleme işleminden beklenen tanecik bağlanmasının oluşmadığı ve kompozit numunenin en ufak bir dış etki ile dağılma eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Daha sonra 425°C ile tekrar sinterleme işlemleri yapılmış ancak yine aynı şekilde taneler arasında istenilen sağlam bağ yapısı elde edilememiştir. Bu denemelerden sonra sıcaklık 450°C ye çıkarılmıştır. Kompozit numunelerin yapısında yüksek oranda ZA-27 alaşımı bulunduğu için, doğal olarak sinterleme işlemi sırasında kompozit yapı içerisindeki ZA-27 malzemenin erime eğilimi göstermesi ve deformasyona uğraması beklenirken böyle olmamıştır. Sinterleme sırasında meydana gelen ısının bir kısmı nano takviye malzemeleri tarafından absorbe edilmiş olduğu daha önce ifade edilmiştir. Bu literatürde pek rastlanmayan sonuç, kompozit yapı içerisindeki CNT nano katkıların çok yüksek yüzey enerjisi ve çok geniş spesifik yüzey alanına atfedilmiştir.

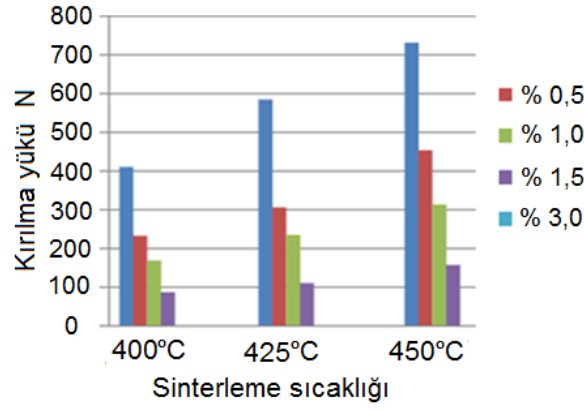
3.6. Üç Nokta Eğme (Çapraz Kırılma) Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Üç nokta eğme deneyleri 5 ton kapasiteli üç nokta eğme deney presinde 50 N/s deney yükü uygulanarak yapılmıştır. Eğme deneylerinden elde edilen kırılma yükü değerleri Şekil 10'daki grafikte verilmiştir.



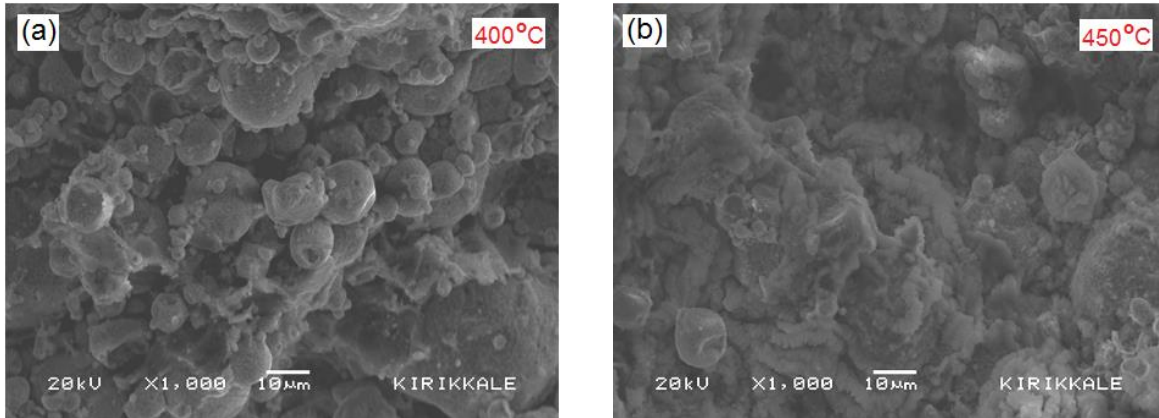
Şekil 10. CNT takviyeli ZA-27 nano kompozitlerin kırılma yükü değerleri

Şekil 10'daki grafikler incelendiğinde, ilk göze çarpan kompozit yapı içerisindeki CNT takviye oranının artışıyla birlikte kırılma yükü değerlerindeki azalmadır. Diğer önemli husus ise sinterleme sıcaklığının artmasıyla bütün takviye oranlarında kırılma yükü değerlerinin de artış göstermesidir. En yüksek kırılma yükü değeri, 450°C de sinterlenmiş %0,5 CNT takviyeli kompozit numunede 732 N olarak ölçülürken, en düşük değer 400°C de sinterlenmiş %3,0 CNT takviyeli kompozit numunede 92 N olarak kaydedilmiştir. Bu iki değer arasında yaklaşık 8,5 kat fark bulunmaktadır. Aynı şekilde bu iki değer ölçüldüğü takviye oranları arasında da 8 kat fark vardır. Buradan çıkaracağımız sonuç, takviye artış oranı ile kırılma yükü değeri arasındaki ters orantıdır. Diğer taraftan kırılma değerlerini sertlik değerleriyle birlikte ele aldığımızda aralarında doğru orantı olduğunu söyleyebiliriz. Sertlik değeri düşük olan yüksek oranda CNT takviyeli numuneler aynı zamanda da düşük kırılma direnci sergilemiştir. Yani takviye oranlarının yükselmesi hem sertlik hem de kırılma yükü değerlerinin düşmesine sebep olmuştur. Yapılan deney ve ölçümler değerlendirildiğinde, takviye oranı ne kadar arttırılırsa kırılma yükü değerinin de o oranda azalacağı sonucu ortaya çıkmıştır. Kırılma yükü değerlerini sinterleme sıcaklıklarıyla birlikte değerlendirmek amacıyla Şekil 11'deki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 11. CNT takviyeli ZA-27 nano kompozitlerin sinterleme sıcaklıklarına göre kırılma yükü değerleri

Şekil 23'deki grafiklere toplu olarak bakıldığında, sinterleme sıcaklığının artışıyla bütün takviye oranlarında ve her iki nano takviye malzemesinin kullanıldığı kompozit numunelerde kırılma yükü değerlerinin artış gösterdiği gözle çarpmaktadır. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla matris malzemesi olan ZA-27 tozlarının arasındaki boyun ve bağ oluşumu olumlu etkilenmiş ve kompozit yapının dayanımı miktar artmıştır. 400°C ila 450°C arasında %10 luk bir değer artışına karşın kırılma yükü değerlerinde ortalama %45 artış gözlenmiştir. Sinterleme sıcaklık artışının nano kompozitlerin kırılmaya karşı direncini önemli ölçüde arttırdığı değerlendirilmiştir. Ayrıca kompozit numunelerin kırılma davranışlarına sinterleme sıcaklığının etkisini incelemek amacıyla, 400°C ve 450°C de sinterlenmiş, %1,5 CNT takviyeli kompozit numunelerin kırık yüzeylerinden $\times 1000$ büyütmede çekilen SEM görüntüleri Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. 400°C ve 450°C de sinterlenmiş, %1,5 CNT takviyeli kompozit numunelerin kırık yüzey görüntüleri

Şekil 12'deki SEM görüntülerine genel olarak bakıldığında kırılmaların gevrek kırılma şeklinde olduğu görülmektedir. SEM görüntüleri dikkatle incelendiğinde; kompozit numunelerin kırılmış bölgelerinde plastik deformasyonun meydana gelmediği ve kırılmanın genellikle yapı içerisindeki taneler arasındaki kopmalardan oluştuğu görülmektedir. Buna göre kırılmaların gevrek kırılma mekanizması şeklinde gerçekleştiği ifade edilebilir. Ayrıca bazı ZA-27 taneciklerinin yapı içerisinden koparak düştüğü ve yerinde boşluk meydana geldiği SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Sinterleme sıcaklığının kırılma üzerindeki etkisini değerlendirecek olursak; 400°C ve 450°C de sinterlenmiş CNT takviyeli kompozit numunelerin kırılmış yüzeyleri arasındaki fark açıkça görülmektedir. 400°C'de sinterlenmiş CNT takviyeli kompozit numunenin kırık yüzeyindeki ZA-27 tanecikleri birbirinden bağımsız ve genellikle aralarında bağ ve boyun oluşturmamış şekilde yer almaktadır Şekil 12 (a). 450°C'de sinterlenmiş CNT takviyeli kompozit numunede ise durum biraz daha farklı görünmektedir. ZA-27 toz tanecikleri arasında tam olmasa da bağ ve boyun oluşumunun gerçekleştiği Şekil 12 (b)'deki mikroyapı görüntüsünden anlaşılmaktadır. Ayrıca sinterleme sıcaklığının artmasıyla yapı içerisindeki taneler arası bağ ve boyun oluşumunun tesiri ile gözenekliliğin de bir miktar azaldığı ifade edilebilir.

4.Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

-Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak elde edilen karbon nanotüp (CNT) malzemesi ile takviye edilmiş kompozitlerde arzu edilen yapısal homojenliği ulaşılamamıştır.

-Kompozit yapılar yer yer yoğun gözeneklilik ile birlikte topaklanma eğilimi sergilemiştir. Bu tür nano malzeme katkı metal matris kompozitlerinin üretiminde farklı kompozit üretim yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması önerilmektedir.

- Kompozit yapıya eklenen CNT takviye elemanı, kompozit yapıların yoğunluğunun azalmasına neden olduğu sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla CNT takviye elemanı oranı % 0,5'ten % 1,0, % 1,5 ve % 3,0'e yükseldiğinde, gözenekli yapı kompozit numunelerin mekanik davranışını çok daha olumsuz bir şekilde etkilemiştir.
- Kompozit yapıdaki CNT takviye elemanı miktarındaki artıştan dolayı, kompozit malzemelerin sertlik değerleri ve çapraz kırılma dayanımları önemli ölçüde azalmıştır. Bununla birlikte, sinterleme sıcaklığının artırılmasıyla sertlik değerleri ve çapraz kırılma dayanımı değerleri kendi içinde artış göstermiştir.
- Kompozit yapıya dahil edilmiş CNT nano takviye elemanı, sinterleme ısıl işlemi sırasında sıcaklığın bir bölümünü absorbe ederek kompozit yapının ve ZA-27 matris malzemesinin sıcaklık direncini artırmıştır. Bu durum CNT takviye elemanının sahip olduğu oldukça geniş spesifik yüzey alanına atfedilmiştir.
- Genel bir sonuç olarak; CNT takviyesinin ZA-27 matrisli kompozitlerin mekanik dayanımını azalttığı, ancak sinterlemede uygulanan sıcaklıktaki artışın kendi içerisinde mekanik dayanımı artırdığı sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma 2018/043 numaralı proje kapsamında Kırıkkale Üniversitesi BAP Birimi tarafından desteklenmiştir.

Referanslar

- ASTM-B 528-05. (2008). Standard Test Method for Transverse Rupture Strength of Metal Powder Specimens. ASTM International West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- Bakshi, S. R., Lahiri, D., Agarwal, A. (2010). Carbon nanotube reinforced metal matrix composites – A Review. International Materials Reviews, 55 (1), 41-61. doi:10.1179/095066009X12572530170543
- Çelebi, M., Çuvalcı, H., Çanakçı, A., Güler O. (2015). Nano-Parçacık Takviyesinin Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretilen ZA-27/Al₂O₃ Kompozitlerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi. MYT-2015, Bayburt, 197-203.
- Dalmis, R., Cuvalci, H., Canakci, A., Guler, O. (2016). Investigation of Graphite Nano Particle Addition on The Physical and Mechanical Properties Of ZA27 Composites. Advanced Composites Letters, 25 (2), 37-42. doi: 10.1177/096369351602500202
- El-Sayed Sherif, M., Latief F.H., Junaedi H., Almajid A. A. (2012). Influence of Exfoliated Graphite Nanoplatelets Particles Additions and Sintering Temperature on the Mechanical Properties of Aluminum Matrix Composites. Int. J. Electrochem. Sci., 7 4352-4361.
- Garg, P., Gupta, P., Kumar, D., Parkash, O., (2016). Structural and Mechanical Properties of Graphene reinforced Aluminum Matrix Composites. J. Mater. Environ. Sci. 7 (5), 1461-1473.
- Islak, S., Kır, D., Buytoz, S. (2014). Effect of Sintering Temperature on Electrical and Microstructure Properties of Hot Pressed Cu-TiC Composites. Science of Sintering, 46, 15-21. doi: 10.2298/SOS1401015I
- Pul, M. (2019). Karbon Nanotüp (CNT) Ve Nano Grafen (G) Takviyeli Al 2024 Kompozitlerin Vorteks Yöntemiyle Üretilerek Aşınma Ve İşlenebilme Özelliklerinin İncelenmesi. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 11 (1), 370-382. doi:10.29137/umagd.493868
- Saheb, N., Khalil, A., Hakeem, A., S., Laoui, T., Al-Aqeeli, N. (2012). Carbon Nanotube Reinforced Al6061 and Al2124 Nanocomposites. ECCM15 - 15th European Conference on Composite Materials, June 24 to 28, Venice, Italy.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M., Koç, E. (2017). Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 23(8), 974-978. doi: 10.5505/pajes.2017.65902
- Zhou, M., Qu, X., Ren, L., Fan, L., Zhang, Y., Guo, Y., Quan, G., Tang, Q., Liu, B., Sun, H. (2017). The Effects of Carbon Nanotubes on the Mechanical and Wear Properties of AZ31 Alloy. Materials, 10, 1385, 1-17. doi:10.3390/ma10121385



IoT based Smart Home Testbed using MQTT Communication Protocol

Fikret Yalçınkaya¹ , Hüseyin Aydılek¹ , Mustafa Yasin Erten^{*1} , Nihat İnanç¹ 

¹Kırıkkale University, Department of Electrical & Electronics Engineering, 71450, Kırıkkale, TURKEY

Başyuru/Received: 04/11/2019

Kabul / Accepted: 11/01/2020

Çevrimiçi Basım / Published Online: 13/01/2020

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Abstract

Technology is developing day by day in the world. In addition, developing technologies bring innovations and conveniences to all areas of life. However, ensuring the continuity of these innovations brought by technology reveals different problems. Smart home approach, which increases the quality of human living areas, is one of the most popular working subjects of recent times. In a smart home, built with the Internet of Things technology products, it is very important that the sensors and control devices communicate in a safer way and work in a coordinated manner to ensure the ecosystem's continuity in a safer way. In this study, an IoT based smart home testbed was realized by using MQTT communication protocol which one of the most used IoT communication protocols. With the developed system, the control of the smart home and the operating performance of the system were controlled with the mobile application. The results obtained in the light of the data provided by the test show that the system developed with the MQTT communication protocol can successfully ensure data flow and control in Smart Home applications.

Key Words

“Smart Home, IoT, MQTT, Testbed”

1. Introduction

Technology is developing rapidly on a daily basis. Together with the developing technology, various technological devices that provide innovation and convenience come into our lives. Automation systems, free of human intervention, have started to take place in human life regularly with the development of technology.

Mankind has needed shelter starting with the creation and has begun to create spaces associated with it. Natural environments forced human to do that and, mankind began to construct their own structures that show the characteristics of the era in which they live and their social and cultural change. Nowadays, the concept of "smart home" has started to emerge with the dominant effect of modern-era technology. With smart home automation concept, it is aimed to provide both energy-time efficiency as well as security, comfort and saving benefits for housing needs.

Smart houses, the first example encountered with the Push Button Mansion in the 1950s, continue to gain various features over time. Push Button Mansion was the first smart home application, it had many features such as windows that close when it rains, lighting that opens automatically to the bell press, garage door that can open and close according to the driving path, fire and burglar alarm systems (Railton, 1950). Studies in recent years are not only about adding features to smart homes, but also energy and waste management (Han et al., 2014), (Zhou et al., 2016), (Anvari-Moghaddam et al., 2016), system security (Kumar, 2014), (Komninos, 2014), (Jacobsson et al., 2016), monitoring (Liu et al, 2016), (Vanus et al., 2017), application development (Aminikhanghahi et al., 2018), (Feng et al., 2017), (Juwan et al., 2019) and the operation of new communication protocols on the system.

Smart home kind of automation can manage our spaces from a single point and gain (add) various security features with the help of smart sensors and smart home assistants used inside or outside the house. All devices and sensors used in the smart home applications are controlled by the master home automation controller, generally called a smart home system. All devices within the smart home system should communicate with each other, by definition, and with the main controller when necessary. The communication of smart devices with each other over a network revealed the concept of Internet of Things (IoT).

IoT can be defined as a network system that allows electronic devices to communicate with each other using various communication protocols. It was first put forward in a presentation by Kevin Ashton in 1999 and it has become the present form with the developing technology. According to the research, the number of devices interacting with each other in 2003 was 500 million but today it has reached to 14 billion and it is estimated that this number will increase to 50 billion by 2020.

IoT systems started to work under many topics. These studies can be classified as the security of a system established with IoT, performances of communication protocols and applications that are included in various fields. (Alrawais et al., 2017), (Nurse et al., 2017), (Dabbagh & Rayes, 2019) have worked on IoT security (Lee et al., 2013), (Johnsen et al, 2013), (Luzuriaga et al ., 2014), (Luzuriaga et al., 2015). The literature review of the communication protocols used in IoT systems and the comparison of their performances is given in Table 1.

Table 1. Comparison Works about IoT Communication Protocols

Author	Application Area	Methods	Performance Comparision
Chen & Kunz, 2016	Healthcare Applications	MQTT, DDS	Latency: DDS (better) Bandwith Cons: MQTT (better)
Mun, D. H., Le Dinh, M., & Kwon, Y. W., 2016, June.	Comparison of protocols in terms of transmission time and energy consumption	CoAP, MQTT, MQTT-SN, Websocket	Web socket is better than other protocols
Kayal, P., & Perros, H. (2017, March.	Smart Parking	CoAP, MQTT, XMPP, Websocket	Lower Server Utilization: CoAP (Better) Multi-threading Support: XMPP (better) Higher Server Utilization: Web socket (better)
Thangavel, D., Ma, X., Valera, A., Tan, H. X., & Tan, C. K. Y., 2014, April.	Comparison	CoAP, MQTT	MQTT lower delay (at lower packet loss) MQTT higher delay (at higher packet loss)

In an IoT system, the communication of devices/things (Publisher / subscriber) with each other or with the broker can only be possible by using the same network protocol. The communication of the devices with each other raises different problems. Network protocol used for communication of devices; network traffic, the amount of data transmitted, the transmission of data, as well as problems with the limited hardware features of the IoT devices with effective hardware and power problems in the issue of important hardware. For this reason, various network protocols have been developed by companies to enable IoT devices to communicate more efficiently.

2. Material and Methods

2.1. IoT

Electronic devices have gained the ability to communicate and share data directly with each other or by creating an ecosystem with the development of technology in recent years, The ability of electronic devices to communicate with each other and to share data using various network structures and protocols has been named as the Internet of Things (IoT) over time.

All kinds of smart electronic devices with connection capacity can be a part of the IoT ecosystem. With the increasing number of these devices, we encounter applications in many fields such as smart home, smart environment, smart city, smart health services, smart agriculture and animal husbandry, and finally smart industrial and military applications.

In an IoT ecosystem built with constrained hardware features, the communication protocol has gained particular importance due to reasons, such as increased communication traffic, power consumption, insufficient processor, memory and storage capacity. For this reason, network protocols such as MQTT, CoAP, AMQP, SOAP have emerged.

2.2. MQTT

Message Queue Telemetry Transport (MQTT) is a message-based communication protocol introduced by IBM in 1999. It is the most common protocol used to exchange data between machines within the Internet of Things platform. This protocol is preferred because the size of the communication packets is small, easy to use and implement, and the network bandwidth is large.

Table 2. Properties Comparison of IoT Communication Protocols

Protocols	CoAP	HTTP	MQTT	WebSocket
Transport	UDP	TCP	TCP	TCP
Messaging	Request/ Response	Request/ Response	Publish/ Subscribe	Asynchronous
Community Support	IPSO, OMA, IETF	IETF, oneM2M	IBM	IETF
Delay	Fair	Fair	Good	Good
Cloud Support	Good	Good	Good	Fair
Power Usage	Good	Good	Fair	Good

MQTT is a protocol based on the publish / subscribe system. This system consists of Client, Broker and Topic. The client represents the devices which are connected to the network and sending and receiving data such as sensors, cell phones, and computers. An MQTT client can be both a publisher or a subscriber. The publisher is the source of the data on the system to be sent. A subscriber is a client who wants to receive messages from the publisher. A MQTT broker is a device that connects clients in the system. The broker is responsible for collecting and maintaining that data when the client connected to it publishes data and processing it properly. It then transmits this data to the subscribers connected to it. The broadcaster and subscriber do not need to work and know each other at the same time. The broker retrieves the data into the buffer in sequence when the client is offline and forwards it when the client is online. It has a queuing system in this way.

The MQTT has a three-stage control package to establish safer communication: a mandatory fixed header, an optional variable header, and a load. Optional fields often complicate the operation of the protocol. CONNECT, CONNACK, PUBLISH, PUBACK, PUBREC, PUBREL, SUBSCRIBE, SUBACK, and MQTT are some of the MQTT control packages that are exchanged between MQTT clients and the MQTT broker.

After a successful network has been established between the MQTT client and the MQTT broker, the control packages are exchanged between the client and the broker. The client that wants to connect to the MQTT broker sends a CONNECT packet specifying its identity, flags, protocol level, and other fields. The server confirms the client through the CONNACK packet with a return code indicating the connection status. This ensures a connection between the client and the broker.

If the client wants to send data as a publisher, it sends a PUBLISH packet to the broker. This package includes QoS transmission level, subject name, load capacity, etc. If the data to be sent is transmitted in QoS 0, the broker does not send any confirmation packet for the broadcast packet. If the data is transmitted to QoS 1, the broker confirms to the client that the packet has been broadcast with the PUBACK packet. In QoS 2, four packages are exchanged. The broker confirms that the PUBLISH package was received with the PUBREC package. The MQTT client then sends a request for the data that it wants to publish with a PUBREL packet. The broker then sends the fourth packet of PUBCOMP, confirming that the message is complete and published once on the given subject, indicating that the transaction is complete.

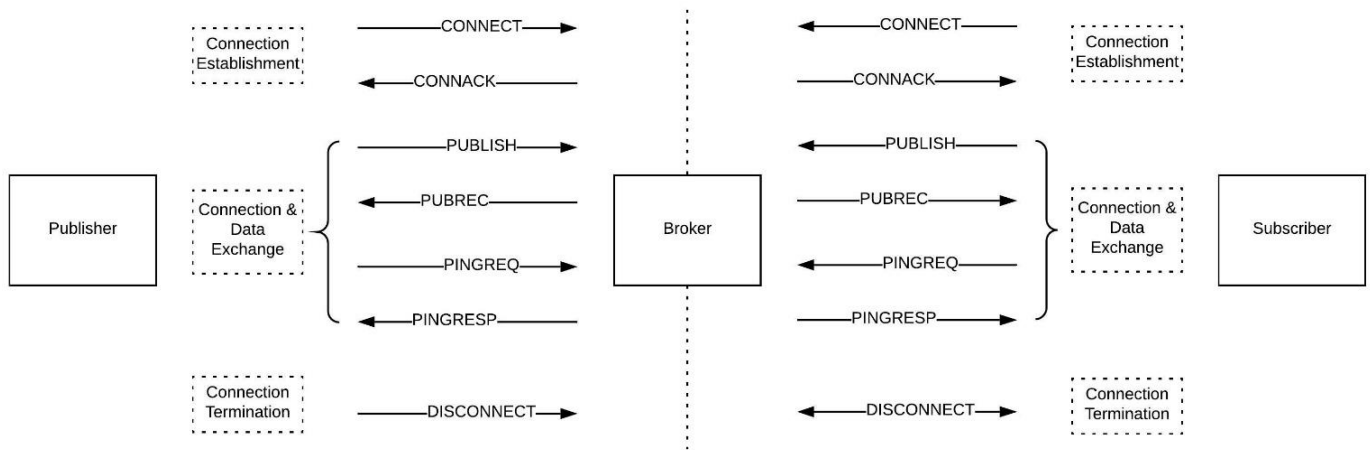


Figure 1. Structure of MQTT Communication

If the MQTT client wants to receive the published message, it sends the SUBSCRIBE packet to the broker. The broker confirms the subscription to the request with the SUBACK package. When the subscription is successful, messages on the specified subject are transmitted to the subscriber with the QoS transmission level. To unsubscribe a topic, the subscriber sends the UNSUBSCRIBE package to the broker and the broker confirms the cancellation of the subscription with the UNSUBACK package.

After a certain timeout period, the connection between the client and the broker is terminated. The client transmits the PINGREQ packet to the server to maintain the connection, indicating that it is active. The MQTT broker responds to the subscriber with the PINGRESP packet and ensures that the connection continues.

The MQTT client sends a DISCONNECT packet to the broker to terminate the connection. The broker does not send a reply packet to the subscriber in response to this packet, but the client then deletes all messages related to the subscriber and the subscriber is disconnected from the broker.

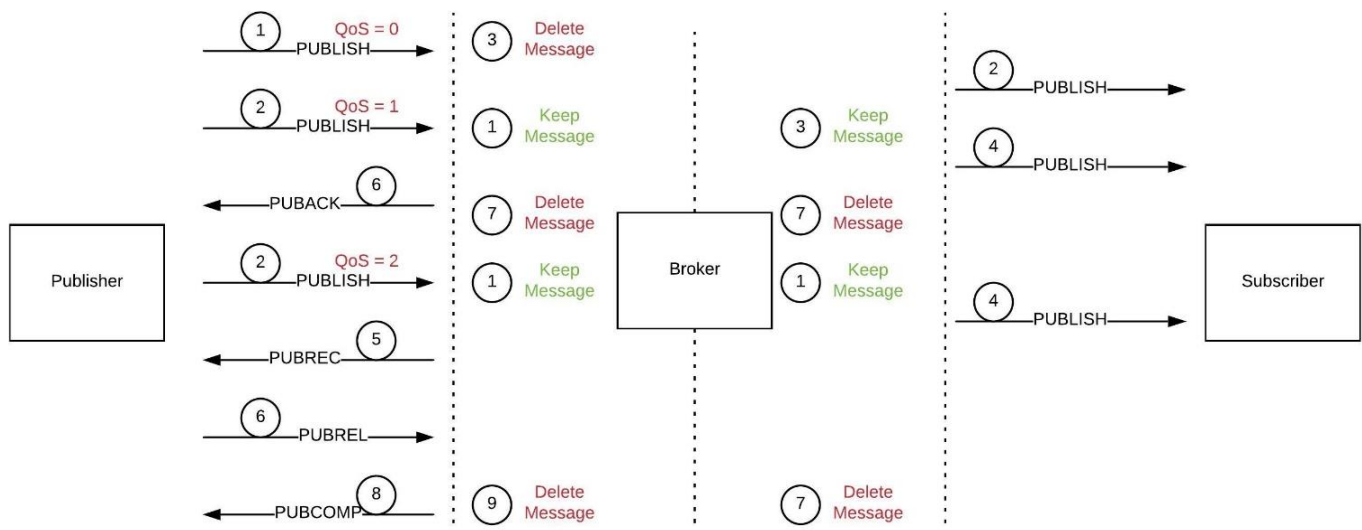


Figure 2. QoS Data Transportation

The MQTT uses QoS levels to transmit messages. QoS is a protocol based on a bilateral agreement of a message with respect to the assurance of data distribution. Although TCP / IP provides guaranteed data presentation, data loss may occur if a TCP connection is broken and transmitted messages are lost. Therefore, MQTT adds 3 QoS levels to the top of TCP:

- a) QoS0 (Up to one time): At this QoS level, the message is sent up to one time and delivery of a message is not guaranteed.
- b) QoS1 (At least once): At this QoS level, the data is sent at least once. It is possible to send a message more than once by setting the repetition of the message.
- c) QoS2 (Exactly once): At this QoS level, the message is sent precisely once using the 4-way handshake system.

3. Developed Application Testbed

In this study, a smart home system test-bed based on IoT system architecture, where communication between things/devices is guaranteed according to MQTT protocols, is realized. The architecture of the system is given in Figure 3.

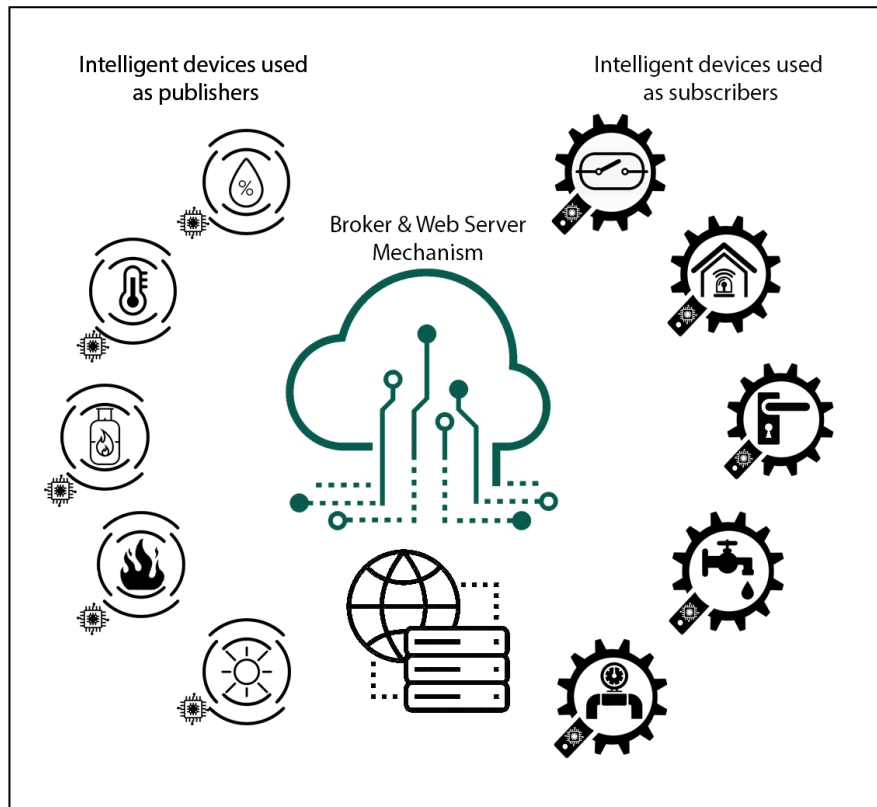


Figure 3. The Architecture of the System

The developed smart home system consists of sensors and control elements (Subscriber / Publisher) and the main central processing unit (Broker). In the developed system, PIR sensor is used for motion detection, MQ4 sensor for gas leak detection, DHT11 sensor for measuring heat and humidity, IR flame sensor for fire detection, photoresistor (LDR) for measuring light intensity and ACS712 for measuring current. Relay, alarm, door lock, water valve and gas valve are used as control elements.

3.1. Establishment of Broker

In the application environment, Raspberry Pi 3 single board computer with ARM microprocessor is used as the main processing unit. This card has been chosen due to its low power consumption, physical dimensions and ease of use. Debian based Raspbian operating system was installed as the operating system on the card. Apache web server is installed for Web Service and database. Following the general configuration of the operating system, the open source Mosquitto MQTT broker, developed by the Eclipse Foundation, was used to manage the MQTT message contents. Mosquitto has been preferred because of its open source structure, it allows for various modifications and add-ons as well as rich documentation. MQTT Server and Apache Web Server integration is provided by means of a developed program to ensure that each data from IoT environment is kept in the database with time tag, message tag and content. In addition, the developed program filters the data collected from IoT environment and sends the data that are determined to be significant at the QoS 2 level.

3.2. Establishment of Publisher

The data collected from the IoT environment via motion sensor, gas sensor, flame sensor, humidity sensor, temperature sensor, LDR and current sensor, which are called as publisher elements, are read with the help of NodeMCU microcontroller and converted to meaningful data and sent to the broker. The general working flow diagram of the publisher elements is given in Figure 4.

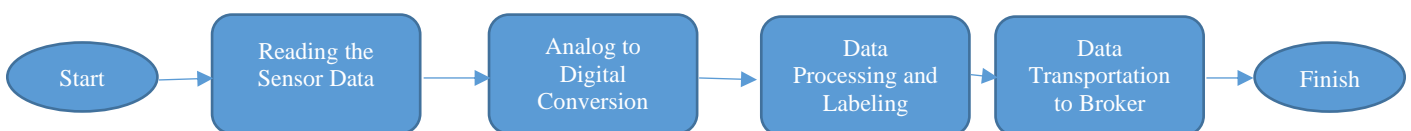


Figure 4. Publisher Systems Flowchart

3.3. Establishment of Subscriber

Relay, alarm, door lock, water valve and gas valve were used as Subscriber elements in the developed system. The NodeMCU microcontroller was used to analyze the data collected from the IoT ecosystem and to transmit the appropriate command to the relevant control elements. The general working flow diagram of the subscriber elements is given in Figure 5.



Figure 5. Subscriber Systems Flowchart

3.4. Development of Mobile Application

Today's technological infrastructure makes it easy to access and control many devices remotely. For a smart home system, remote monitoring and control is an important requirement. A mobile application has been developed to remotely monitor the data in the test environment and to control the control elements remotely. The developed mobile application is designed for two-way operation. If the mobile device is connected to the same Wi-Fi network as the smart home, the mobile application acts as a part of the IoT ecosystem and acts as both a publisher and a subscriber. If the mobile device accesses to the Internet through a different network, the device can control the ecosystem and examine the data via the web service. The mobile application was developed in accordance with Android mobile devices. The screenshots of the application are given in Figure 6.

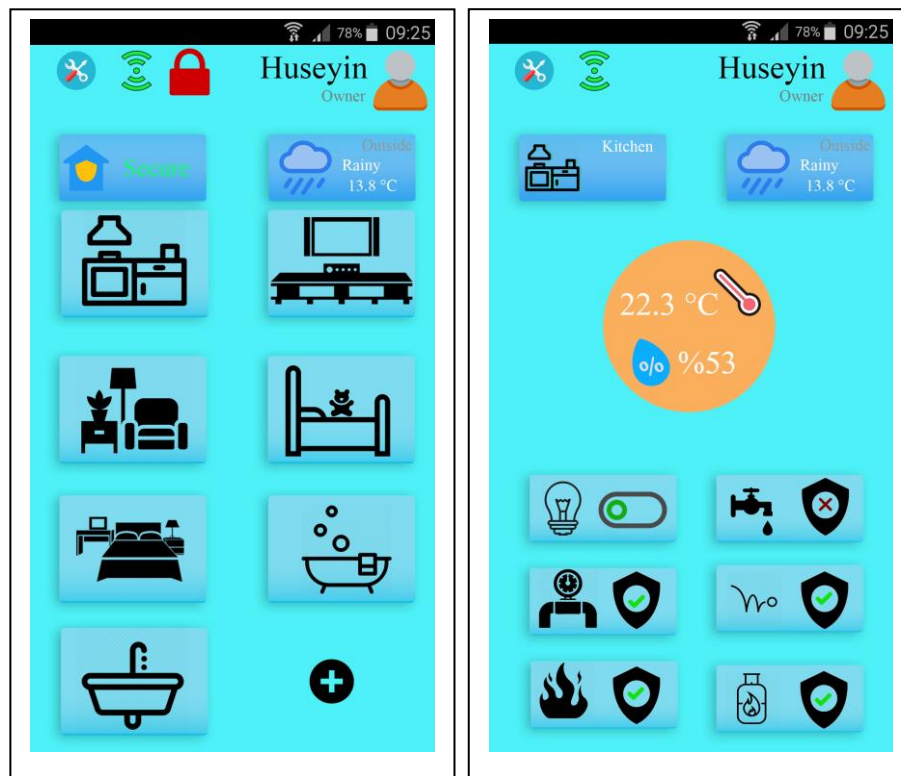


Figure 6. Mobile Application Interface

4. Results

The test environment was tested and run under various scenarios. The scenarios created are summarized below.

Scenario 1: Single Publisher & Single Subscriber are Active

In this scenario, the publisher and the subscriber first checked for the system work and performance for their own case. The system was then tested in cases where both the publisher and the subscriber were working simultaneously. In addition to this scenario, the mobile device was first tested alone by connecting to the same Wi-Fi network and connecting to a different network. The mobile device, which passed the tests without any problems, was tested by connecting to the system even in the case of both the publisher and the subscriber. In cases where there is only one publisher and one subscriber, the system works without any problems.

Scenario 2: Two Publishers & Two Subscribers are Active

In this scenario, the system was tested for two publishers and two participants actively working. The mobile application was tested in this scenario by connecting to both the same Wi-Fi network and different network. In cases where there were two publishers and two participants, the system worked without any problems.

Scenario 3: All Publishers & All Subscribers are Active

In this scenario, the status of all (seven) publishers and all (five) participants in the system is tested. In addition to this scenario, the mobile application is integrated into the system both by connecting to the same Wi-Fi network and over different Wi-Fi networks. While the mobile application was connected to the same Wi-Fi network, there was no problem in communication and control. However, when the mobile application is connected to a different Wi-Fi network, it is observed that there are no problems in the application monitoring functions but there are delays in the control functions.

5. Discussions

In this study, an IoT based smart home test environment was realized by using MQTT communication protocol. Various sensors and control elements were added to the IoT ecosystem and the performance of the MQTT communication protocol on different scenarios was tested. The developed mechanism has been tested in all scenarios in which all publishers and participants are connected and it has been observed that it works without any problem. The developed test environment experienced delay problems in control functions in the scenario where the mobile application was connected to a network other than the multiple subscriber and publisher. It has worked successfully in all other test scenarios and passed the tests successfully. As a result of the test application, it was observed that the MQTT communication protocol is suitable for an IoT smart home system.

It is thought that the mentioned problems can be overcome with the improvements to be made on the mobile application. In future studies, it is considered that studies on comparing MQTT and CoAP communication protocols and system scaling can be performed.

References

- Alrawais, A., Alhothaily, A., Hu, C., & Cheng, X. (2017). Fog computing for the internet of things: Security and privacy issues. *IEEE Internet Computing*, 21(2), 34-42.
- Aminikhanghahi, S., Wang, T., & Cook, D. J. (2018). Real-time change point detection with application to smart home time series data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 31(5), 1010-1023.
- Anvari-Moghaddam, A., Monsef, H., & Rahimi-Kian, A. (2014). Optimal smart home energy management considering energy saving and a comfortable lifestyle. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(1), 324-332.
- Chen, Y., & Kunz, T. (2016, April). Performance evaluation of IoT protocols under a constrained wireless access network. In 2016 IEEE International Conference on Selected Topics in Mobile & Wireless Networking (MoWNeT) (pp. 1-7).
- Dabbagh, M., & Rayes, A. (2019). Internet of things security and privacy. In *Internet of Things From Hype to Reality* (pp. 211-238). Springer, Cham.
- Han, J., Choi, C. S., Park, W. K., Lee, I., & Kim, S. H. (2014, January). Smart home energy management system including renewable energy based on ZigBee and PLC. In 2014 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE) (pp. 544-545).
- Jacobsson, A., Boldt, M., & Carlsson, B. (2016). A risk analysis of a smart home automation system. *Future Generation Computer Systems*, 56, 719-733.
- Johnsen, F. T., Bloebaum, T. H., Avlesen, M., Spjelkavik, S., & Vik, B. (2013, October). Evaluation of transport protocols for web services. In *IEEE 2013 Military Communications and Information Systems Conference* (pp. 1-6).
- Kayal, P., & Perros, H. (2017, March). A comparison of IoT application layer protocols through a smart parking implementation. 2017, *IEEE 20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks (ICIN)* (pp. 331-336).
- Komninos, N., Philippou, E., & Pitsillides, A. (2014). Survey in smart grid and smart home security: Issues, challenges and countermeasures. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(4), 1933-1954.
- Kumar, S. (2014). Ubiquitous smart home system using android application. *arXiv preprint arXiv:1402.2114*.

- Lee, S., Kim, H., Hong, D. K., & Ju, H. (2013, January). Correlation analysis of MQTT loss and delay according to QoS level. In 2013 IEEE The International Conference on Information Networking (ICOIN) (pp. 714-717).
- Liu, L., Stroulia, E., Nikolaidis, I., Miguel-Cruz, A., & Rincon, A. R. (2016). Smart homes and home health monitoring technologies for older adults: A systematic review. *International journal of medical informatics*, 91, 44-59.
- Luzuriaga, J. E., Perez, M., Boronat, P., Cano, J. C., Calafate, C., & Manzoni, P. (2015, January). A comparative evaluation of AMQP and MQTT protocols over unstable and mobile networks. In 2015 12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC) (pp. 931-936).
- Luzuriaga, J. E., Perez, M., Boronat, P., Cano, J. C., Calafate, C., & Manzoni, P. (2014, September). Testing AMQP protocol on unstable and mobile networks. In *International Conference on Internet and Distributed Computing Systems* (pp. 250-260). Springer, Cham.
- Mun, D. H., Le Dinh, M., & Kwon, Y. W. (2016, June). An assessment of internet of things protocols for resource-constrained applications. In 2016 IEEE 40th Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC) (Vol. 1, pp. 555-560).
- Nurse, J. R., Creese, S., & De Roure, D. (2017). Security risk assessment in Internet of Things systems. *IT Professional*, 19(5), 20-26.
- Railton, A. R. (1950). Push-Button Manor. *Popular Mechanics*, 6(94), 84-87.
- Thangavel, D., Ma, X., Valera, A., Tan, H. X., & Tan, C. K. Y. (2014, April). Performance evaluation of MQTT and CoAP via a common middleware. In 2014 IEEE ninth international conference on intelligent sensors, sensor networks and information processing (ISSNIP) (pp. 1-6).
- Vanus, J., Belesova, J., Martinek, R., Nedoma, J., Fajkus, M., Bilik, P., & Zidek, J. (2017). Monitoring of the daily living activities in smart home care. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 7(1), 30.
- Zhou, B., Li, W., Chan, K. W., Cao, Y., Kuang, Y., Liu, X., & Wang, X. (2016). Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 30-40.



e-issn: 1308-5514