



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

Yahya DOĞU
Dekan / Dean

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

Haziran 2019 / June 2019

Kapak Tasarım / Graphics Design : Hüseyin AYDİLEK

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

- A. Serdar YILMAZ Sütçü İmam Üniversitesi
Ahmet Kürşat TÜRKER 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

- Lavanta (*Lavandula angustifolia*) Katkısının Yonca Silajlarının Kalitesi Üzerine Etkisi**
1 *Effect of Lavender (*Lavandula angustifolia*) Additive on the Quality of Alfaalfa Silages* 426-431
Asuman Arslan Duru
DOI: 10.29137/umagd.486921
- Tünel Aydınlatma Sistemlerinde Aydınlık Düzeyi Toleransının Bakım Faktörüne Göre Saptanması**
2 *Detection of Luminance Level Tolerance in Tunnel Lighting Systems by Maintenance Factor* 432-441
Mehmet Sait Cengiz
DOI: 10.29137/umagd.473926
- Yapay Sinir Ağı Eğitim Algoritmaları ile İki Yönlü Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakalarda Termal Gerilme Analizi**
3 *Thermal Stress Analysis in Two-Directional Functionally Graded Plates with Artificial Neural Network Training Algorithms* 442-450
Munise Didem Demirbaş, Didem Çakır
DOI: 10.29137/umagd.485604
- AZ91 Mg Alaşımına Farklı Oranlarda Sb İlavesi İle Katılma Hızının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi**
4 *Effects of Solidification Rate on Microstructure and Mechanical Properties with Sb at Different Ratio of AZ91 Quality Mg Alloy* 451-463
Levent Elen, Yunus Türen , Erkan Koç
DOI: 10.29137/umagd.507264
- İmge Kümeleriyle Yüz Tanıma için Otomatik Ön İşleme**
5 *Autonomous Preprocessing for Image Set Based Face Recognition* 464-473
Hasan Serhan Yavuz, Meltem Seyirt
DOI: 10.29137/umagd.510731
- Seramik Sağlık Gereçleri Ürünlerinde Piroplastik Deformasyonun Azaltılmasına Bağlı Olarak Geliştirilen Kompozisyonların Üretim Maliyeti Açısından Değerlendirilmesi**
6 *Evaluation of Production Costs Based on Reduction of Pyroplastic Deformation in Ceramic Sanitaryware Products* 474-480
Nazım Kunduracı, Baran Tarhan, Cahide Sarısakal
DOI: 10.29137/umagd.484352
- Investigation of Sintering Behaviour of Bone China Bodies Produced by Bone China Wastes**
7 *Fazilet Güngör* 481-488
DOI: 10.29137/umagd.480632
- Mekanik Tapalardaki Pandül ve Rotor Ağırlık Değişimlerinin Namlu Önü Emniyetine Etkilerinin İncelenmesi**
8 *Investigation Of The Effects Of Changes In Weights Of Pallets And Rotors In Mechanical Fuzes On Muzzle Safety* 489-495
Zühtü Onur Pehlivanlı, Serhad Yıldız
DOI: 10.29137/umagd.532598

- Karabük İl Merkezinde Bulunan Şehit Şendoğan Topçu İlkokulunun Bedensel Engelli Bireyler İçin Ulaşılabilirliğinin İncelenmesi**
9 *Examination of the Accessibility for the Physically Disabled Individuals of Şehit Şendoğan Topçu Primary School in Karabük Province Centre* 496-506
Şenol Gürsoy, Cem Cüneyt Ceylan, Yüksel Turcan
DOI: 10.29137/umagd.420311
- Polyester Bağlayıcı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri**
10 *Mechanical Properties of Polyester Based Composites* 507-514
Özer Sevim
DOI: 10.29137/umagd.495051
- Betonarme Binalarda Kısa Kolon Etkilerinin Araştırılması**
11 *Investigation of Short Column Effects in Reinforcement Concrete Buildings* 515-527
Emrah Meral
DOI: 10.29137/umagd.495192
- Bir İç Lojistik Sistem Probleminin, Araç Rotalama Çözüm Yöntemleri ile İyileştirilmesi**
12 *Improvement of an Plant Logistics System Problem with Vehicle Routing Solution Methods* 528-541
Seçil Kulaç, Gültekin Çağıl
DOI: 10.29137/umagd.495518
- Adaptive Right Median Filter for Salt-and-Pepper Noise Removal**
13 *Uğur Erkan, Levent Gökrem, Serdar Enginoğlu* 542-550
DOI: 10.29137/umagd.495904
- A Mixed Integer Linear Programming Model for Finding Optimum Operating Conditions of Experimental Design Variables Using Computer-Aided Optimal Experimental Designs**
14 551-559
Akın Özdemir
DOI: 10.29137/umagd.497045
- Döner Kanatlı Hava Araçları İçin Uçuş Verileri Kayıt Cihazı Tasarımının Sonlu Elaman Analizleri ve Deneysel Olarak Doğrulanması**
15 *Finite Element Analysis and Experimental Verification of Flight Data Recorder Design for Rotary Wing Aircraft* 560-575
Barış Kalaycıoğlu, Hakan Arslan, İlhan Yapar
DOI: 10.29137/umagd.497996
- Al₂O₃ Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerde Mekanik Alaşımlama Süresinin Korozyon Davranışına Etkilerinin İncelenmesi**
16 *The Investigation of Effects of Mechanical Alloying Duration on Corrosion Behavior of Aluminum Composites Reinforced with Al₂O₃* 576-583
Hasan Karabulut, Kubilay Karacıf, Ramazan Çıtak
DOI: 10.29137/umagd.507023
- Betonarme Kolonların Şekil Değiştirme Esaslı Hasar Sınırlarının Araştırılması**
17 *Investigation of Deformation Based Damage Limits of Reinforced Concrete Column* 584-601
Saeid Foroughi, S. Bahadır Yüksel
DOI: 10.29137/umagd.519208

- Çözündürme ve Yaşlandırma İşleminin Al-7Si-4Zn-3Cu Alaşımının Sürtünme ve Aşınma Özelliklerine Etkisi**
18 *Effect of Age Hardening on the Wear Behaviour of the Al-7Si-4Zn-3Cu Alloy* 602-611
Yasin Alemdağ, Murat Beder
DOI: 10.29137/umagd.531910
- Impedimetric Cell Detection using Microfluidic Viscoelastic Focusing**
19 *Mikroakışkan Viskoelastik Hizalama ile Empedansa Dayalı Hücre Algılama* 612-619
Çağlar Elbüken
DOI: 10.29137/umagd.532269
- 750 V DC Beslemeli Bir Demiryolu Cer Merkezinde Güç Kalitesi Probleminin UVDGM Bazlı DSTATKOM İle Çözülmesi**
20 *Solving Power Quality Problem of 750 V DC Railway Substation With DSTATCOM Using SVPWM* 620-626
Mehmet Taciddin Akçay, İlhan Kocaarlan
DOI: 10.29137/umagd.532418
- Derin Maden Sondajlarında Ön İnceleme Aşaması Mühendislik Yaklaşımları ve Fizibilite Etütlerinin Gerçekleştirilmesi**
21 *Preliminary Stage Engineering Approaches in Deep Mining Drilling and Performing the Feasibility Investigations* 627-636
Mustafa Can Canoğlu
DOI: 10.29137/umagd.532738
- Akımsız Kaplama Yöntemi ile Üretilmiş Grafen Takviyeli Gümüş Matrisli Nanokompozitlerin Yapısal Özelliklerine Banyo Bileşiminin Etkisi**
22 *Effect of Bath Composition on Structural Properties of Graphene Reinforcement Silver Matrix produced by Electroless Deposition* 637-642
Ramazan Karşlıoğlu
DOI: 10.29137/umagd.539224
- Katkısız Hidroksiapatit ve Gümüş Katkılı Hidroksiapatit Fiziksel ve Kimyasal Karakterizasyonu**
23 *Physical and Chemical Characterization of Hydroxyapatite and Silver Doped Hydroxyapatite* 643-656
Mustafa B. Türköz, Ümit Erdem
DOI: 10.29137/umagd.539364
- Basıncılı İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen AA2024 Veya AA6061 Matrisli, B₄C Veya SiC Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mikroyapı, Mekanik Ve Isıl İletkenlik Özelliklerine Basıncın Etkisi**
24 *Effect Of Pressure On The Microstructure, Mechanical and Thermal Conductivity Properties Of Composite Materials with Matrix of AA2024 or AA6061 and Reinforced B₄C or SiC Produced by Pressurized Infiltration Method* 657-669
Kadir Gündoğan, Alperen R.B. Özşarı
DOI: 10.29137/umagd.540610
- An Experimental Study To Determine Sliding Shear Strength And Internal Friction Coefficient Of Clay Brick Wall In A Masonry Building**
25 *Orhan Doğan, Orhan Gazi Odacıoğlu* 670-676
DOI: 10.29137/umagd.545396

- Şarj Bitme Kaygısı ve Şarj İhtiyacıyla İlgili Olumsuz Duyguların Mobil Uygulama Enerji Tüketim Beklentisinde Rolü: Kırıkkale İlinde Bir Araştırma**
26 *The Role of Charging-Out Anxiety and Negative Emotions Related to Charging Needs in Mobile Application Energy Consumption Expectations: A Research in Kırıkkale Province* 677-684
İbrahim Bozacı, Ramazan Güngüneş, Ertuğrul Çam
DOI: 10.29137/umagd.594255
- Bakır ve Magnezyum Katkılarının Al-17Si Alaşımının Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkisi**
27 *Effect of Copper and Magnesium Additions on the Structural, Mechanical and Tribological Properties of the Al-17Si Alloy* 685-694
Ali Paşa Hekimoğlu, Murat Hacıosmanoğlu
DOI: 10.29137/umagd.546562
- Kapalı Döngü Fiberoptik Jiroskop Sistemleri için Yerçekimi Arama Algoritmasına Dayalı PID Kontrolcü Tasarımı**
28 *Design of PID controller based on Gravitational Search Algorithm for Closed Loop Fiberoptic Gyroscope* 695-704
Hüsamettin Şerbetçi, İsa Navruz
DOI: 10.29137/umagd.555971
- Porselen Karo Üretimlerinde Konya Kili Kullanımı**
29 *Use of Konya Clay for Porcelain Tile Productions* 705-712
Müge Tarhan
DOI: 10.29137/umagd.556840
- Küçük Ölçekli Francis Türbini Tasarımı Ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi**
30 *Small Scale Francis Turbine Design And Computational Fluid Dynamics Analyses* 713-729
Hakan Yontar, Salih Karaaslan, Nuri Yücel
DOI: 10.29137/umagd.557597
- Perlit Esaslı Geopolimer Kompozitlere Kür Süresi ve Sıcaklığın Etkisi**
31 *Effect Of Curing Time and Temperature on Perlite-Based Geopolimer Composites* 730-737
Selahattin Güzelküçük, İlhami Demir
DOI: 10.29137/umagd.558983
- Nokta Bulutu Verileri Kullanarak Tarihi Edirne Mihalbey Hamamı'nın Farklı Modellerle İrdelenmesi**
32 *Examine of Historical Edirne Mihalbey Public Bath With Different Models By Using Point Cloud Data* 738-747
Yusuf Demirel, Fatih Aydoğmuş
DOI: 10.29137/umagd.559295
- Kırıkkale Çoruzözü Deresi'nde Bir Boyutlu Taşkın Modellemesi**
33 *One Dimensional Flood Flow Modelling In The Kırıkkale Çoruhözü Stream* 748-758
Ali Doğu, Osman Yıldız
DOI: 10.29137/umagd.567086
- Ebru Sanatı Temasının Dökme Taş Teknolojisinde Uygulanabilirliğinin Araştırılması**
34 *Investigation of the Applicability of Ebru Art in Cast Stone Technology* 759-768
Murat Gökçe
DOI: 10.29137/umagd.567539



Lavanta (*Lavandula angustifolia*) Katkısının Yonca Silajlarının Kalitesi Üzerine Etkisi

Effect of Lavender (*Lavandula angustifolia*) Additive on the Quality of Alfaalfa Silages

Asuman Arslan Duru

Uşak Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Zootekni Bölümü, 64200, Uşak, TÜRKİYE..

Başvuru/Received: 23/11/2018

Kabul/Accepted: 05/03/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Bu çalışmada, farklı düzeylerde ilave edilen lavanta (*Lavandula angustifolia*) çiçek +sapının yonca silajlarının kalitesi üzerine etkileri araştırılmıştır. Araştırmada, silaj katkı materyalini oluşturan lavantanın çiçeği ve sapı eşit düzeylerde (% 50 + % 50) karıştırılarak kullanılmıştır. Lavanta (çiçek + sap) yonca silajlarına % 0 (kontrol), 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 düzeylerinde ilave edilmiştir. Araştırma sonunda, % 2 lavanta ilavesiyle yonca silajlarının NDF içerikleri artmıştır ($P<0.05$). KM, OM, ADF ve HP içerikleri ve duyu analizi sonuçları bakımından önemli bir farklılık bulunamamıştır ($P>0.05$). Kontrol grubunun pH değeri, % 2 lavanta katkılı grup dışındaki diğer gruplara nazaran önemli düzeyde düşük olduğu belirlenmiştir ($P<0.05$). Lavanta katkılı yonca silajlarında asetik asit, bütirik asit, *Enterobacteriaceae*, *Listeria* spp, sülfid indirgeyen anaeroblara ve mayaya rastlanmamıştır. Küf içeriği, en düşük % 0.5 lavanta katkılı gruplarda saptanmıştır. Bu verilere göre, lavantanın (çiçek+sap) yonca silajlarında daha yüksek düzeylerde kullanılması veya sap kısmının ayrılarak çiçek kısmının silaj kalitesine etkisinin araştırılmasına yönelik çalışmalar yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Yonca, lavanta, silaj, kalite, duyu analizi, mikrobiyoloji”

Abstract

In this study, the effects of lavender (*Lavandula angustifolia*) flowers and stem on the quality of alfaalfa silages added at different levels were investigated. In the research, flower and stem of lavender which constitute the silage additive material were mixed at equal levels (50% + 50%). Lavender (flower + stem) was added to alfaalfa silages at 0 % (control), 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 levels. At the end of the study, NDF content of alfaalfa silages increased with the addition of 2% lavender ($P < 0.05$). There were no significant difference in the dry matter, organic matter, ADF, crude protein and sensory analysis results ($P > 0.05$). The pH value of the control group was found to be significantly lower than the other groups except for the 2% lavender added group ($P < 0.05$). Acetic acid, butyric acid, *Enterobacteriaceae*, *Listeria* spp., sulfide reducing anaerobes and yeast were not found in the alfaalfa silages added with lavender. Mold content was determined in the lowest 0.5% lavender-added groups. According to this result, it has been concluded that lavender (flower + stem) should be used at higher levels in alfaalfa silages or studies should be carried out to investigate the effect of the flower part on silage quality by separating the stem part.

Key Words

“Alfaalfa, lavender, silage, quality, sensory, microbiology”

1. Giriş

Çok yıllık ve Akdeniz bölgesinde yetişen bir bitki olan lavanta, ballıbabagiller (*Lamiaceae*) familyasından *Lavandula* cinsini oluşturan türlerin genel ismidir. Lavantanın başak biçimdeki mor çiçekleri çalıya benzemektedir (Atalay, 2008; Orbay, 2014). Sapı ve çiçeklerinin içerdiği yüksek kaliteli uçucu yağ nedeniyle dünyada kültürü yapılan önemli bir parfüm, kozmetik ve ilaç bitkisidir (Guenther, 1952). Parfüm ve kozmetik sanayiinde kullanılan lavanta uçucu yağı ve lavanta çiçeği ağrı kesici, sakinleştirici, stres kovucu, uykusuzluk giderici, idrar sökücü, kalp güçlendirici, romatizma ağrılarını dindirici, antiseptik, antibiyotik etkisi ve egzama, cilt yanıklığı ve kızarıklığına karşı olumlu etkileri olduğu bilinmektedir (Arabacı&Bayram, 2005; Kesici Güler vd., 2015). Yine lavantadan elde edilen uçucu yağların rumende metan gazını azaltıcı etkisi olduğu bildirilmiştir (Djabri vd., 2016). Toprak yönünden seçici bir bitki olmayan lavanta kurağa, sıcağa ve soğuğa çok dayanıklı olup kireççe zengin kuru ve kalkerli topraklarda çok iyi yetişebilmektedir. Vegetatif ve generatif olarak üretilen bir bitkidir. Dekara verimi tür, çeşit, iklim ve toprak koşullarına göre 100 ile 500 kg arasında değişmektedir (Aslanca&Saribaş, 2011).

Hayvancılık işletmesinin toplam giderlerinin % 65-70'ini yem giderlerinin oluşturduğu bilinmektedir. Hayvan beslemede kullanılacak alternatif yem katkılarının bu giderlerin azalmasına neden olacak dolayısıyla daha düşük maliyetle daha yüksek verim elde edilebilecektir. Birçok faydasının olduğu ve rumende metan gazı oranını azalttığı bilinen ve ayrıca önemli bir yere sahip olabileceği düşünülen lavantanın ruminant hayvan beslemede özelliklerinin daha iyi ortaya konulması ve silajlara katkı olarak değerlendirilme imkânının belirlenmesi önem arz etmektedir. Yapılan literatür araştırmasında lavanta çiçek ve sapı karışımının silolanabilirliğe etkisi konusunda yapılan herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışma ile yoncaya çeşitli düzeylerde ilave edilen lavantanın (çiçek+sap) silaj kalitesinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, silolanan lavanta ve yonca karışımının kimyasal, fermentasyon, mikrobiyolojik ve duyuşal özellikleri belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Silo materyali: Araştırmada kullanılan silo ana materyali olan yonca, bölgede faaliyet gösteren bir yetiştiriciden hasat edildiği günden bir gün sonra araziden taze olarak alınmış ve aynı gün silolama yapılmıştır. Silolama dönemi 60 gün devam etmiştir. Silaj örnekleri, 3 paralel olarak 1 lt'lik anaerob cam kavanozlara hazırlanmıştır. Silaj katkı maddesi olarak kullanılan lavanta çiçeği ve sapı eşit oranlarda (% 50 + %50) karıştırılmış ve yonca silajlarına fermentasyon artırıcı olarak % 0 (kontrol), 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 düzeylerinde ilave edilmiştir.

Kimyasal Analizler: Silolamada dönemi sonunda kitleyi temsil edecek şekilde alınan silaj örnekleri sirkülasyonlu etüvde 65 °C'de 48 saat kurutmaya tabi tutulduktan sonra kuru madde değerleri belirlenmiştir (AOAC, 1999). Örnekler kurutulduktan sonra 1 mm elek çapında öğütülmüş ve AOAC (1999)'da belirtilen şekilde 550 C'de 4 saat kül fırınında yakılarak örneklerin ham kül ve Kjeldahl yöntemiyle de ham protein içerikleri saptanmıştır. Asit deterjan fiber (ADF) ve nötr deterjan fiber (NDF) analizleri Van Soest vd. (1991)'nin bildirdiği şekilde Fiber Analyzer (Ankom Technology Corp. Fairport, NY, USA) cihazı kullanılarak yapılmıştır (Ankom, 1998). Silajlar açıldıklarında, silaj örneklerine ait pH değerleri belirlenmek üzere, 25 g silaj örneği üzerine 100 ml saf su ilave edilecek ve çalkalayıcı ile karıştırıldıktan sonra elde edilen sıvının pH'sı dijital pH metreyle ölçüm yapılmıştır (Polan vd., 1998). Yine silajların açımından hemen sonra 40 g silaj örneği alınmış ve 360 ml saf su ilave edilerek çalkalanmıştır. Çalkama işlemi sonrasında karışım Whatman no:1 kağıdından süzölmüş ve elde edilen süzükten 100 ml alınarak Kjeldahl distilasyon yöntemiyle NH₃-N tayini yapılmıştır. Aynı filtreatan 2 ml alınarak silajların uçucu yağ asitleri (UYA) ve laktik asit içeriklerini tespit etmek üzere analizlerin gerçekleştirileceği güne kadar -18°C'de derin dondurucuda muhafaza edilmiştir. Analiz gününde derin dondurucudan alınan örneklerin HPLC cihazında UYA (asetik asit, propiyonik asit ve bütirik asit) ve laktik asit analizleri yapılmıştır (Cihaz özellikleri: Kolon: C18, 5 µm, 4.6 x 250-mm; Mobil Faz: Isocratic; 25-mM K-phosphate buffer; pH 2.4; Akış Hızı: 1.5 mL/min.; Kolon Sıcaklığı: 30 °C; UV Dedektör: Wavelength: 210 nm; Enjeksiyon Hacmi: 20 µL).

Mikrobiyolojik Analizler: Her bir silajda Stanley vd. (1971)'nin bildirdiği yonteme göre sülfid indirgeyen anaeroblar, Harrigan (1998)'in bildirdiği yonteme göre de laktik asit bakteri sayısı, *Enterobacteriaceae*, *Listeria* spp., maya ve küf olup olmadığı belirlenmiştir.

Duyuşal Analizler: Silajların açılmasıyla birlikte, silajlara ait fiziksel özellikleri (renk, koku ve strüktür) ve kalite puanları, deneyim sahibi 6 panelist tarafından Alman Tarım Örgütü (DLG, 1987) silaj değerlendirme cetvelleri kullanılarak yapılmıştır.

İstatistik Analizleri: Elde edilen sonuçlar, SPSS 16.01 paket programda One-Way Anova prosedürüne göre analiz edilmiş olup, grupların farklılıkları için Duncan Çoklu Karşılaştırma Testi uygulanmıştır. Ayrıca silajların mikrobiyolojik analizleri yine SPSS Paket Programı'nda Sıklık prosedürüne göre analiz edilmiştir (SPSS, 2007).

3. Bulgular ve Tartışma

Tablo 1'de verilen değerler incelendiğinde, lavantanın (çiçek+sap) yonca silajlarına farklı düzeylerde ilavesiyle kuru madde içeriğinde önemli bir değişiklik görülmemiştir (P>0.05). Silolama her ne kadar koşullarda yapılsa da iyi kalitede silaj için gerekli fermentasyon koşulları sağlanamadığında silajlarda bulunması istenmeyen mikroorganizmaların çoğalmasıyla kuru madde kayıpları söz konusu olmaktadır (Bolsen vd., 1996). Sonuç olarak, yonca silajlarına lavanta katkısının siloda istenmeyen unsurların gelişimini durdurarak kuru madde kayıplarını durdurduğu söylenebilir. Ayrıca farklı düzeylerde lavanta içeren yonca silajlarında görülen % 25.24-26.53 arasında değişen kuru madde oranları literatür bildirişleri ile uyumludur. Yonca silajlarına farklı katkı maddesi ilave eden Pour vd. (2017) ve Koç vd. (2017) benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Farklı düzeylerde lavanta ilavesiyle yonca silajlarının ham kül, organik madde ve ADF içeriklerinde önemli bir farklılık saptanmamıştır (P>0.05). Yonca silajlarına Çiftçi vd. (2005) elma püresi ve Koç vd. (2017) inokulant ilavesiyle ham kül, ham protein ve ADF içeriklerinin değişmediğini bildirmişlerdir. % 2 lavanta ilavesiyle yonca silajlarının NDF içeriğinin arttığı görülmüştür (P<0.05). Ke vd (2015), yoncaya elma ve üzüm posası ilavesiyle silajların NDF içeriğinin arttığını belirtmişlerdir. Sonuçlar arasındaki bu farklılık yonca silajlarının farklı

katkı materyalleri ile silolanmasından kaynaklanmış olabilir. Fermentasyon artırıcı olarak silajlarda kullanılan lavantanın özellikle sap kısmının NDF değerinin nispeten yüksek olması, silajlardaki düzeyi arttıkça NDF değerinin artmasına etki etmiş olabilir.

Tablo 1. Lavanta (çiçek+sap) ilave edilen yonca silajlarının kimyasal analizleri

Parametreler	Kontrol	% 0.5 Lavanta	% 1.0 Lavanta	% 1.5 Lavanta	% 2.0 Lavanta	\bar{X}	P
KM, %	25.50	25.24	25.62	25.70	26.53	25.72	0.48
HK, %	13.49	14.93	14.43	14.91	14.60	14.42	0.01
OM, % KM	10.98	9.94	11.20	10.58	11.64	10.86	0.43
NDF, % KM	34.95 ^b	33.92 ^b	33.36 ^b	34.00 ^b	37.93 ^a	34.85	0.03
ADF, % KM	27.27	25.38	26.22	25.72	28.65	26.71	0.18
HP, % KM	18.54	18.77	18.74	18.39	17.96	18.48	0.38

^{a-b} Aynı satırda farklı harfleri taşıyan gruplar içerisindeki farklılıklar istatistiki olarak önemlidir (P<0.05).

KM: Kuru Madde; OM: Organik Madde; HK: Ham Kül; NDF: Nötr Deterjan Fiber; ADF: Asit Deterjan Fiber; HP: Ham Protein

Lavanta (çiçek+sap) ilave edilen yonca silajları fermentasyon özellikler bakımından incelendiğinde ise (Tablo 2), kontrol grubunun pH değeri, % 0.5, 1.0 ve % 1.5 lavanta ilave edilen gruplara nazaran önemli düzeyde düşük olduğu belirlenmiştir (P<0.05). Lavanta katkılı yonca silajlarının laktik asit içerikleri arasında önemli bir farklılık olmadığı belirlenmiştir (P>0.05). Lavanta ilaveli yonca silajlarında asetik asit ve bütirik asit içeriğine rastlanmamıştır. Kontrol grubunda % 0.98 düzeyinde propiyonik asit içeriği saptanmış olup, diğer gruplarda propiyonik asit içeriği tespit edilememiştir. Silajların kalitesini, fermentasyonu esnasında oluşan pH ve organik asitlerin miktarı ve kompozisyonları belirlemektedir. Fermentasyonun erken aşamasında ortam pH'sındaki düşüş hızı iyi bir silaj elde etmek için büyük önem taşımaktadır. Bu bulgular, yonca silajlarına fermentasyon artırıcı olarak Canbolat vd. (2013)'nın gladiçya meyvesi; Ünlü vd. (2015)'nin öğütülmüş dane mısırsı; Denek vd. (2012)'nin taze ve donmuş fermente sıvı ilavesi ile pH değerinin düştüğü ve laktik asit içeriğinin ise arttığını bildirdikleri bulgularla uyumlu değildir. Bu çalışmalarda yonca silajlarında farklı düzeylerde farklı katkı maddeleri kullanıldığından çalışmaya benzer sonuçlar elde edilemediği ve lavanta sapının pH değerini artırdığı düşünülmektedir. Bütirik asit bakterileri, silajların fermentasyon esnasında asetik asit bakterilerinin en önemli rakibidir. Bunun nedeni, silo yemlerinde bütirik asit üretimiyle önemli miktarda besin madde kaybı meydana gelmektedir. Bu bakteriler, asetik asit bakterilerinin kullandığı karbonhidratları kullanarak ihtiyaçları olan besin maddelerini ya çok azaltırlar ya da tamamen tüketmektedirler. Bu nedenle silajlarda bütirik asit istenmemektedir (Alçiçek&Özkan, 1997). Yoncaya lavanta ilave edilmesiyle elde edilen silajlardaki yeterli laktik asit içeriği ve istenilen seviyelere yakın olduğu tespit edilen pH değerleri, bütirik asit bakterilerinin çoğalmasını engelleyerek silonun fermentasyonun olumsuz yönde gelişmesini önlemiştir. Filya vd. (2001) ve Tabacco vd. (2006), yonca silajlarına katkı maddesi ilavesiyle bütirik asit içeriğinin olmadığını belirtmişlerdir.

Tablo 2. Lavanta (çiçek+sap) ilave edilen yonca silajlarının fermentasyon özellikleri

Parametreler	Kontrol	% 0.5 Lavanta	% 1.0 Lavanta	% 1.5 Lavanta	% 2.0 Lavanta	\bar{X}	P
pH	5.09 ^b	5.51 ^a	5.41 ^a	5.52 ^a	5.20 ^{ab}	5.32	0.02
LA, %	3.02	3.20	2.97	2.97	2.74	2.98	0.92
AA, %	-	-	-	-	-	-	-
PA, %	0.98	-	-	-	-	-	-
BA, %	-	-	-	-	-	-	-

^{a-b} Aynı satırda farklı harfleri taşıyan gruplar içerisindeki farklılıklar istatistiki olarak önemlidir (P<0.05).

LA: Laktik asit; AA: Asetik asit; PA: Propiyonik asit; BA: Bütirik asit.

Farklı düzeylerde lavanta ilave edilen yonca silajlarının mikrobiyolojik analizlerine ait sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, % 2.0 lavanta ilave edilen yonca silajlarının laktik asit bakteri sayısı diğer gruplara nazaran önemli düzeyde yüksek bulunmuştur (P<0.01). Araştırmadaki bütün gruplarda *Enterobacteriaceae*, *Listeria* spp., maya ve sülfid indirgeyen anaeroblara rastlanmamıştır. En yüksek küf içeriğine kontrol grubunda rastlanırken, en düşük % 0.5 lavanta içeren grupta sadece bir örnekte 2.3 log cfu/g olduğu belirlenmiştir. Silajlara oksijen girişi olduğunda veya iyi bir silolama yapılamadığı durumlarda özellikle küf ve maya popülasyonu olmak üzere istenmeyen mikroorganizmaların silo kabı içerisinde içeriği giderek artmaktadır. Sonuç olarak, silajda büyük oranda ve gözle görülür bir şekilde bozulma meydana gelmektedir. Bu zararlı mikroorganizmalar, silaj bünyesindeki suda çözünabilir karbonhidratlar, organik asitler ve nitrojenli bileşikler gibi eriyebilir komponentleri tüketmek suretiyle kendilerini geliştirmektedirler. Sonuç olarak, silajların içerdiği besin maddeleri oranı azalmaktadır (Filya, 2005). Yoncaya lavanta ilavesiyle silajlarda laktik asit bakteri sayısı artarak istenmeyen mikroorganizmaların gelişimini baskıladığı hatta oluşunu önlediği anlaşılmaktadır. Benzer şekilde, Canbolat vd. (2013), gladiçya meyvesinin yonca silajlarına ilavesiyle laktik asit bakterileri sayısının arttığını ve küflenmenin azaldığını belirtmişlerdir.

Tablo 3. Lavanta (çiçek+sap) ilave edilen yonca silajlarının mikrobiyolojik özellikleri (log cfu/g)

Parametreler	Kontrol	% 0.5 Lavanta	% 1.0 Lavanta	% 1.5 Lavanta	% 2.0 Lavanta
Laktik Asit Bakterileri*	4.37±0.20 ^b	4.51±0.17 ^b	4.13±0.15 ^b	4.40±0.04 ^b	5.15±0.09 ^a
<i>Enterobacteriaceae</i>	-	-	-	-	-
<i>Listeria spp</i>	-	-	-	-	-
Sülfid İndirgeyen Anaeroblar	-	-	-	-	-
Maya	-	-	-	-	-
Küf	4.37 (2 örnek ortalaması)	2.3 (1 örnek)	3.8 (2 örnek ortalaması)	2.9 (1 örnek)	2.75 (2 örnek ortalaması)

^{a-b} Aynı satırda farklı harfleri taşıyan gruplar içerisindeki farklılıklar istatistik olarak önemlidir (P<0.01).

Lavanta katkılı yonca silajları görünüşleri bakımından incelendiğinde (Tablo 4), gruplar arasında önemli bir farklılık bulunmamıştır. % 2 lavanta ilave edilen grubun toplam kalite değeri gruplar arasındaki en yüksek değer olarak 14.12 olarak belirlenmişse de bu değer sayısal düzeyde kalmıştır. Alman Tarım Örgütü (DLG, 1987) tarafından önerilen silaj değerlendirme cetveli kullanılarak yapılan silaj kalite saptamasında, 16-20 puan arası “pekiyi”, 10-15 puan arası da “memnuniyet verici” olarak nitelendirilmektedir. Yoncaya farklı düzeylerde lavanta ilavesiyle elde edilen silajların toplam kalite sınıfını bütün gruplarda “Memnuniyet Verici” olarak belirlenmiştir. Ünlü vd. (2015)’nin yoncaya öğütülmüş dane mısır ilavesiyle renk değerlendirmesinde önemli farklılık olmadığını ancak strüktür ve koku kriterlerinin iyileştiği sonucuna varmışlardır (P<0.01). Benzer bir çalışmada, Arslan Duru ve Aksu Elmalı (2016), yoncaya mısır kırmacı, buğday kırmacı, melas ve formik asit ilavesiyle silajların kokularında önemli bir değişiklik olmadığı (P>0.05) ancak strüktür ve rengin özellikle de melas içeren grupta iyileştiğini bildirmişlerdir.

Tablo 4. Lavanta (çiçek+sap) ilave edilen yonca silajlarının duyu analizi

Parametreler	Kontrol	% 0.5 Lavanta	% 1.0 Lavanta	% 1.5 Lavanta	% 2.0 Lavanta	\bar{X}	P
Koku	8.11	8.33	9.00	7.78	9.78	8.60	0.61
Strüktür	3.11	2.83	3.06	3.06	2.78	2.97	0.84
Renk	1.56	1.50	1.56	1.56	1.56	1.54	0.99
Toplam	12.78	12.66	13.62	12.40	14.12	13.11	
Kalite Sınıfı	M.V.*	M.V.	M.V.	M.V.	M.V.		

*M.V.: Memnuniyet Verici

4. Sonuç

Çalışma sonunda elde edilen veriler neticesinde, % 2 lavanta içeren grubun NDF içeriği yükselmiş ve kontrol grubunun pH değeri düşük bulunmuştur. Ancak silajlarda bitirir asit içeriğine rastlanmamış ve laktik asit içeriği istenen seviyelerde olduğu görülmüştür. Duyusal analiz değerleri dikkate alındığında ise, % 2 lavanta içeren grubun en yüksek değerde olduğu anlaşılmışsa da sayısal düzeyde kalmıştır. Ayrıca lavanta ilavesi ile silajlarda laktik asit bakteri sayısı artmış ve küf miktarında azalma görülmüştür. Silajlarda koruyucu olarak kullanılabilecek potansiyele sahip lavantanın ya daha yüksek miktarlarda ya da sap kısmının ayrılarak silajlara ilave edilmesi konusunda çalışmalar yapılması gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma, “II. International Scientific and Vocational Studies Congress (BILMES 2018)” kapsamında sunulmuştur.

Referanslar

Alçiçek, A. & Özkan, K. (1997). Silo yemlerinde fiziksel ve kimyasal yöntemlerle silaj kalitesinin saptanması. Türkiye I. Silaj Kong. Bildirileri. 16-19 Eylül, Bursa, 241-246.

Ankom, (1998). Procedures for fibre and in vitro analysis. Asseda. <http://www.ankom.com>.

AOAC (1999). Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, 16th Ed., Arlington VA.

Arabacı, O. & Bayram, E. (2005). Aydın Ekolojik Koşullarında Lavanta (*Lavandula Angustifolia* Mill.)’nın bazı Agronomik ve Kalite Özellikleri Üzerine Bitki Sıklığı ve Azotlu Gübrenin Etkisi. ADÜ Ziraat Fakültesi Dergisi, 2(2): 13-19.

- Arslan Duru, A. & Aksu Elmalı D. (2016). Farklı Katkı Maddelerinin Yonca Silajlarında Bazı Kalite Özellikleri Üzerine Etkisi. 1st of International INES Academic Researches Congress (INES 2016), Antalya, Turkey.
- Aslanca, H. & Sarıbaşı, R. (2011). Lavanta Yetiştiriciliği. Meyvecilik Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü. Yayın No.41.
- Atalay, A.T. (2008). Konya ekolojik şartlarında yetiştirilen lavanta (*lavandula angustifolia* mill.)’da farklı dozlarda uygulanan organik ve inorganik azotlu gübrelerin verim ve kalite özellikleri üzerine etkileri. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı. Yüksek Lisans Tezi, 46 s.
- Bolsen, K.K., Ashbell, G. & Weinberg, Z.G. (1996). Silage fermentation and silage additives. *Asian Austral J Anim Sci*, 9 (5): 483-493, 1996. doi:5713/ajas.1996.483
- Canbolat Ö., Kalkan H. & Filya İ. (2013). Yonca Silajlarında Katkı Maddesi Olarak *Gleditsia Triacanthos* Kullanılma Olanakları. *Kafkas Üniv Vet Fak Derg*, 19 (2): 291-297. doi: 10.9775/kvfd.2012.7710
- Canbolat Ö., Kalkan H., Karaman Ş. & Filya İ. (2010). Üzüm Posasının Yonca Silajlarında Karbonhidrat Kaynağı Olarak Kullanılma Olanakları. *Kafkas Univ Vet Fak Derg*, 16 (2), 269-276. doi:10.9775/kvfd.2009.679
- Çiftçi M., Çerçi İ.H., Dalkılıç B., Güler T. & Ertaş O.N. (2005). Elmanın Karbonhidrat Kaynağı Olarak Yonca Silajına Katılma Olanaklarının Araştırılması. *YYÜ Vet Fak Derg*, 16 (2), 93-98. ISSN: 1308-3651
- Denek, N., Can A., Avcı, M & Aksu, T. (2012). The effect of fresh and frozen pre-fermented juice on the fermentation quality of alfalfa silage. *Kafkas Univ. Vet. Fak. Derg.*,18(5): 785-790. doi: 10.9775/kvfd.2012.6396
- Djabri, B., Rouabhi, R., Arhab, R., Attar, F. & Bousseboua, H. (2016). Antimethanogenic activity of essential oils extracted from *Rosmarinus officinalis* and *Lavandula officinalis*. *BioTechnology An Indian Journal*, 12(2): 107-112. ISSN : 0974 – 7435
- DLG (1987). *Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere. 4. Schweine*. DLG-Verlag GmbH, Frankfurt, Germany.
- Ergün A., Tuncer Ş. D., Çolpan İ., Yalçın S., Yıldız G., Küçükersan M. K., Küçükersan S., Şehu A. & Saçaklı P. (2013). Yemler Yem Hijyeni ve Teknolojisi. Pozitif matbaacılık, Ankara, Türkiye. pp. 61-97.
- Filya, İ., Ashbell, G., Weinberg, Z.G. & Hen, Y. (2001). Hücre duvarını parçalayıcı enzimlerin yonca silajlarının fermantasyon özellikleri, hücre duvarı kapsamı. ve aerobik stabiliteyi üzerine etkileri. *Ankara Üniv Zir Fak Tarım Bilim Derg*,7 (3): 81-87, 2001. doi: 10.1501/Tarimbil_00000000652
- Filya, İ. (2005). Silaj Yapımı Teknolojisi ve Kullanımı. Süttaş Süt Hayvancılığı Eğitim Merkezi Yayınları. Hayvancılık Serisi: 2. Yetiştirici El Kitabı.
- Guenther, E. (1952). *The Essential Oils*. Van Nostrand, New York, USA, p. 453.
- Harrigan, W. F., (1998), *Laboratory methods in food microbiology* 3rd ed., Academic Press, London, UK.,
- Hashemzadeh-Cigari, F., Khorvash, M., Ghorbani, G.R., Ghasemi, E., Taghizadeh, A., Kargar, S. & Yang, W.Z. (2014) Interactive effects of molasses by homofermentative and heterofermentative inoculants on fermentation quality, nitrogen fractionation, nutritive value and aerobic stability of wilted alfalfa (*Medicago sativa* L) silage. *J Anim Physiol Anim Nutr* 98, 290–299. doi: 10.1111/jpn.12079
- Ke, W.C., Yang, F.Y., Undersander, D. J. & Guo, X.S. 2015. Fermentation characteristics, aerobic stability, proteolysis and lipid composition of alfalfa silage ensiled with apple or grape pomace. *Animal Feed Science and Technology* 202 (2015) 12–19. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2015.01.009
- Kesici Güler, H., Dönmez, İ.E. & Alay Aksoy, S. (2015). Tıbbi ve Aromatik Bitkilerin Antibakteriyel Aktivitesi ve Tekstil Sektöründe Kullanımı. *SDU Journal of Science*. 10 (2): 27-34.
- Koç, F., Aksoy, S.O., Okur, A.A., Celikyurt, G., Korucu, D. & Ozduven, M.L. 2017. Effect of pre-fermented juice, *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus buchneri* on the fermentation characteristics and aerobic stability of high dry matter alfalfa bale silage. *The Journal of Animal & Plant Sciences*, 27(6): 1766-1773. ISSN: 1018-7081
- Lee, K.C. (1988). The effect of ensiling on the quality of forage crops. *Herbage abstracts/National Library of Australia*. 58.6.1481.
- Orbay, A.E. (2014). Konya çevresinde yetişen içilebilir bazı tıbbi bitkilerin yağ asit kompozisyonlarının belirlenmesi ve karşılaştırılması. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı. Yüksek Lisans Tezi, 66 s.

Polan, C.E., Stive, D.E. & Garrett, J.L. (1998). Protein preservation and ruminal degradation of ensiled forage treated with heat, formic acid, ammonia, or microbial inoculant, *Journal of Dairy Science*, 81, 765-776. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(98)75633-4

Pour, H.A., Naserian, A.A., Vakili, A.R., Tahmasbi, A.M. (2017). Effect of Essential Plant Oil Used as an Additive to Alter Silage Fermentation in Ruminant by In Vitro. *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 14(1), 145-152. doi: <http://dx.doi.org/10.13005/bbra/2429>

SPSS (2007). SPSS for Windows Release 16.01. SPSS Incorporation. 2007.

Stanley, E. R., Bradley, T. R., & Sumner, M. A. (1971). Properties of the mouse embryo conditioned medium factor(s) stimulating colony formation by mouse bone marrow cells grown in vitro. *J. Cell. Physiol.* 78, 301–317. doi: 10.1002/jcp.1040780219

Şakalar, B. & Kamalak A. (2016). Melaslı kuru şeker pancarı posasının yonca bitkisinin silolanmasında kullanılması. *Anadolu Tarım Bilim. Derg.* 31: 157-164. doi: 10.7161/anajas.2016.31.1.157-164

Ünlü, H.B., Ayyılmaz, T. & Kılıç, A. (2015). Farklı düzeylerde öğütülmüş dane mısır ilavesinin yonca silajının yem değeri üzerine etkisi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 52 (3): 335-341. doi: 10.20289/euzfd.07936

Van Soest P. J., Robertson J. D. & Lewis B. A. (1991). Methods for Dietary Fibre, Neutral Detergent Fibre and Non-Starch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition, *Journal of Dairy Science*, 74, 3583–3597. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2.



Tünel Aydınlatma Sistemlerinde Aydınlık Düzeyi Toleransının Bakım Faktörüne Göre Saptanması

Detection of Luminance Level Tolerance in Tunnel Lighting Systems by Maintenance Factor

Mehmet Sait Cengiz¹

¹Department of Technical Vocational School Bitlis Eren University, Bitlis, TURKEY

Başvuru/Received: 23/10/2018

Kabul/Accepted: 05/03/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Bu çalışmada gün boyunca sürekli olarak çalışan tünel aydınlatma sistemlerinde bakım faktörünün etkisi simülasyon ortamında incelenmiştir. Bakım faktörünü oluşturan temel parametreler anlatılarak bu parametrelerinde kirlilik gibi parametrelerin bakım faktörü hesabına katılması gerektiği hesaplamalı olarak ortaya konulmuştur. Sürekli devrede olan-çalışan tünel aydınlatmasında meydana gelen performans kayıplarının, bakım faktörü çarpanını küçülttüğü anlaşılmış olup, standart bakım faktörü yerine detaylandırılmış bakım faktörünün kullanılması gerektiği görülmektedir. Buna göre tünel aydınlatmasının ilk kurulumu esnasında hesaplanan %E değerine performans kaybına neden olan diğer etkilerde eklenerek bakım faktörü hesabı yapılmalıdır. Bu işlemler simülasyon ortamında yapılarak Standart bakım faktörü ve detaylandırılmış bakım faktörü sonuçları karşılaştırılarak, ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Aydınlik düzeyi, tünel aydınlatma, bakım faktörü”

Abstract

In this study, the effect of maintenance factor in tunnel lighting systems which are continuously working throughout the day has been investigated in simulation environment. The main parameters that constitute the maintenance factor are explained and calculated as the pollution factor in such parameters. It is understood that the performance factor of continuous tunnel lighting diminishes the factor of maintenance factor and it is seen that detailed maintenance factor should be used instead of standard maintenance factor. During the first installation of the tunnel, the calculated E% value should be added to other effects that cause performance loss and the maintenance factor calculation should be made. By performing these operations in simulation environment, the results of standard maintenance factor and detailed factor have been compared and the results have been evaluated.

Key Words

“Light level, tunnel lighting, maintenance factor”

1. Giriş

Günümüzde enerji kaynaklarının sınırsızmış gibi kullanılması insanoğluna tasarruf yapma zorunluluğu getirmiştir (Gil-Martin ve ark., 2015). Bu amaçla özellikle bilim insanları enerji tasarrufuna yönelik çalışmalar yürütmektedir. Enerji tüketiminin yüksek olduğu alanlardan biride tünel yol aydınlatmasıdır. Bu aydınlatma yapılırken gereksiz enerji sarfiyatı yapılmadan maliyetleri arttırmadan tüketim yapılmalıdır (Cengiz ve Mamiş, 2015; Cengiz ve ark., 2018). Bu çalışmada sürekli devrede kalan tünel aydınlatma sistemlerinin elektrifikasyonu incelenmiştir. Tünel aydınlatmasında temel amaç, gece ve gündüz şartlarında, güvenli araç veya trafik akışını sağlamaktır. Tünel aydınlatma performansı; yol yüzeyi ve duvarların aydınlatma düzeyi, genel ve boyuna aydınlatma düzgünlüğü, kamaşma kontrolü, nesnelerin algılanabilmesi için gerekli kontrastın oluşturulabilmesi ve titreşim frekansı gibi parametrelere bağlıdır.

Tünel aydınlatma tasarımı yapılırken, hesaplamalarda fren mesafesine dikkat edilir. Bu mesafe sürücünün önündeki engeli görüp tepki verme süresiyle ilgilidir. Fren mesafesi aydınlatma tasarımının temel dayanağını oluşturduğu gibi aynı zamanda tünel aydınlatmasının gerekliliğini de ortaya koyar. Tünel boyunca sürücülerin, emniyetli ve rahatsız olmadan tünele girmesi, tünel boyunca ilerlemesi ve tünel çıkışında sürüşüne devam etmesi trafik güvenliği açısından çok önemlidir. Sürücünün tünel içerisinde bir cisim fark edebilmesi için aydınlık düzeyinin ve ortalama parlılığın doğru ve optimum olması gereklidir. Tünel aydınlatmasında zorlu koşullara maruz kalan elektriksel elemanların ekonomik ömrünü tespit etmek, meydana gelecek performans kayıplarını öngörmek ve bunlara müdahale etmek zaman ile işgücü açısından büyük zorluklar taşımaktadır. Bu nedenle aydınlatmada tolerans payının geniş tutulması elektrik tüketimini arttırmış gibi görünse de toplam kazanım (ekonomik, teknik ve işgücü) açısından fayda sağlamaktadır.

2. Aydınlatma Düzeyi Performans Kayıpları

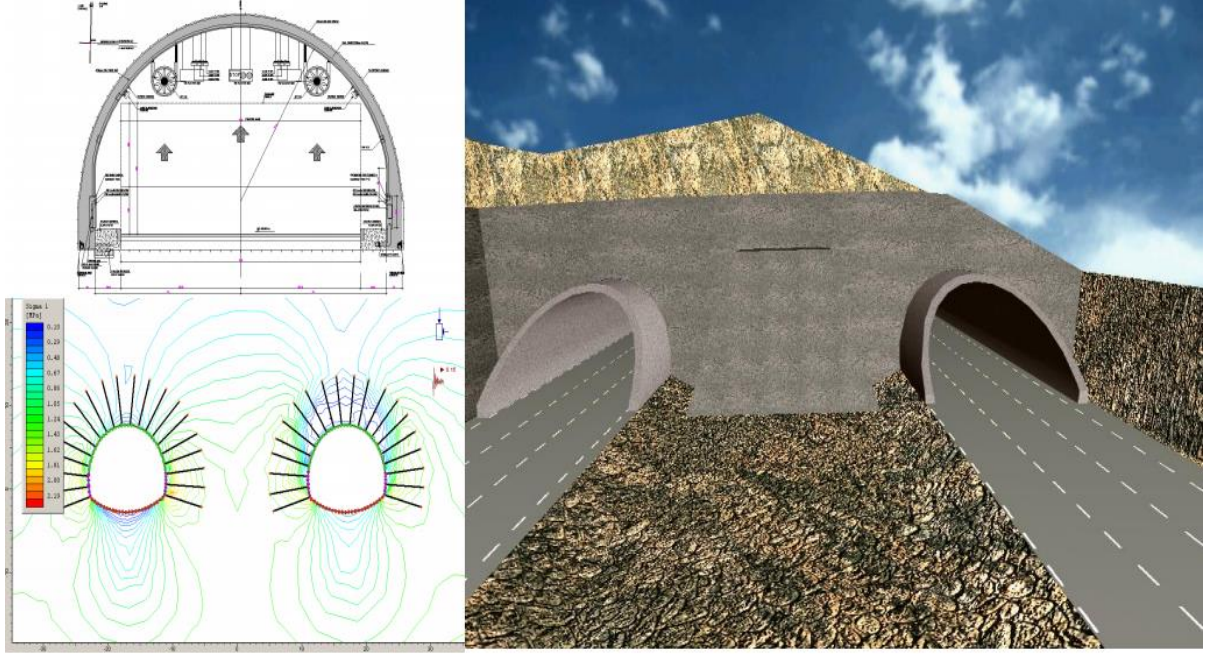
Tünel aydınlatmasında aydınlatmanın tanımını sürücü için görüş konforunun sağlanması olarak tanımlayabiliriz. Sürekli olarak devrede kalan tünel aydınlatmasında kullanılan aydınlatma elemanlarının ışık akısı değerlerinde zamanla azalmalar meydana gelmektedir. Yani zamanla aydınlatma elemanlarının ekonomik ömürleri dolmaktadır. Armatürler kullanıldıkça ekonomik ömrünü doldurup kirlenme etkileriyle birlikte performans kaybı yaşarlar. Performans kaybında önemli bir etkende kullanıma bağlı olarak ışık akısındaki azalmadır. Şekil 1'de kullanımda olan sodyum buharlı çift askı tertibatlı örnek tünel aydınlatması görülmektedir.



Şekil 1. Sodyum buharlı çift askı tertibatlı örnek tünel aydınlatması

Armatürlerin performansları zamana bağlı olarak azaldığından, aydınlatma sisteminin performansı belirlenmiş bir süre için tanımlıdır. Belirlenen zaman aralığında yani armatürlerin kullanım süresi dolunca tüm armatürlerin yenilenmesi veya armatürlerin performanslarının iyileştirilmesi (armatür cam temizliği, lamba değişimi) gibi bakım işlemleri yapılmalıdır. Aydınlatma sisteminin en düşük performansa düştüğü anda dahi, tünel içinde yeterli aydınlatma sağlanabilmelidir. Bunu sağlamak için tünel aydınlatma tasarımı yapılırken simülasyon veya hesaplama ile öngörülen performans düşümünün sistem performansına eklenmesi yöntemi uygulanmalıdır.

Lambaların ışık düzeylerindeki azalma ve bakım eksiklikleri sebebiyle aydınlatmada oluşacak yetersizlikler görme koşullarını olumsuz etkiler. Bu aşamada kullanılacak aydınlatma simülasyon programları, ilk kurulum aşamasında tünel aydınlatmasında gerekli tolerans payını tespit etmek için büyük kolaylıklar sağlar. Bu amaçla literatürde bir çok fonksiyonu gerçekleştirecek bireysel simülasyonlar hazırlanmıştır (Arı ve ark., 2017; Çıbuk ve Balık, 2011). Bu yöndeki çalışmalar akıllı şebekelere geçişi ve otomasyonu artırarak verimliliğine katkı sunmaktadır (Efe ve Cebeci, 2013; Olga ve ark., 2019; Cengiz, 2013; Ruchkina ve ark., 2019; Cengiz 2014; Efe ve Cebeci, 2015; Eruğrul, 2011). Bu çalışmada yol-tünel aydınlatmasına yönelik bir simülasyondan faydalanılmıştır. Şekil 2'de Üç şeritli tünel aydınlatması simülasyon görünümü verilmiştir (Protek, 2017).



Şekil 2. Üç şeritli tünel aydınlatması simülasyon görünümü

Bir aydınlatma aygıtı minimum aydınlatma düzeyini, kullanım süresi boyunca sağlamalıdır. Aydınlatma performansındaki kayıp aydınlatma aygıtlarında bakımı zorunlu hale getirmektedir. Tünel aydınlatmasında kullanılan aydınlatma aygıtları kullanım süresi dolsa dahi (en minimum düzeyde) ihtiyaca cevap verecek toleransa uygun olarak tesis edilmelidir (Eren ve ark. 2017; Gencer ve ark., 2017). Bu nedenle tolerans payına bağlı bakım faktörünün doğru hesaplanması gereklidir. Bir aydınlatma sisteminin toplam maliyetinde, bakım faktörü elektrik tüketimini arttırdığı için önemli yer tutmaktadır. Çünkü bakım faktörü aydınlatma parametreleri ile çarpan konumunda olduğundan, direk olarak enerji tüketimini arttırmaktadır.

Aydınlatma hesaplama programlarında bakım faktörü bir çarpan olarak kullanılmaktadır. Performans hesabında bakım faktörü, denklem 1’de Aydınlık düzeyi (E) bağıntısında görüldüğü gibi çarpan olarak kullanılır (Cengiz, 2019). Denklem 1’de aydınlık düzeyi ile bakım faktörü ilişkisi görülmektedir.

$$E = \frac{I * \cos^3 \varepsilon * \Phi}{H^2} * BF \quad (1)$$

Denklem 1’de I : ışık şiddeti (cd), Φ : ışık akısı (lm), BF: bakım faktörü, H: armatürün yerden yüksekliği (m), ε : armatürden yüzeye gelen ışık ile yüzeyin normali arasındaki açıyı ifade eder (Özkaya, 1994; TS EN 13201-2).

3. Bakım Faktörü Parametreleri

Bakım faktörü çeşitli parametrelerin toplam etkisinden oluşmaktadır. Bunların en önemlileri; Lümen Bakım Faktörü (LBF), Canlılık Faktörü (CF), Armatür Bakım Faktörü (ABF) ve Optik etki (OE) (LED lamba için) gibi parametrelerdir (Cengiz ve Cengiz, 2018).

3.1 Armatür bakım faktörü

Aydınlatma performansının tayininde önem arz eden parametreler armatürler ve işletme koşullarıdır. Armatürlerin ekonomik ömrü ve çevresel faktörler, aydınlatma verimindeki kayıpların sebebidir. Kirlenen armatür yüzeyleri nedeniyle ışık geçirgenliği azalınca lambaların verimliliği de azalır. Bu etkiye bakım faktörü denilir. Armatürlerin belirlenen süre boyunca performansını koruması için armatür camının temizlenmesi veya lambaların değiştirilmesi gibi bakım işlemleri yapılmalıdır.

Bakım faktörü, belirli bir süre sonunda bir aydınlatma sistemi tarafından sağlanacak performansı, dönemin başındaki performansa bağlı olarak belirleyen bir parametredir. Bakım faktörü, bakım süresinin sonunda %15 performans kaybının tahmin edildiği bir sistem için %85 olarak tanımlanır.

Bakım faktörü armatürlerin teknolojik düzeyine göre değişir. CIE 154:2003’e göre, armatürlerin bakım faktörü, birden çok performans göstergesinin ürünüdür. Bakım faktörü armatürlerin kirlenme düzeyine, armatürde kullanılan ışık kaynağına ve ışık akısında azalmaya neden olabilecek tüm etkilere bağlıdır. Tablo 1’de Armatürün koruma derecesine ve çevre kirliliği kategorisine göre armatür bakım faktörü görülmektedir (CIE-154, 2003; CIE-88, 2004).

Tablo 1. Armatürün koruma derecesine ve çevre kirliliği kategorisine göre armatür bakım faktörü

Armatür Koruma Sınıfı	Kirlilik Kategorisi	Bakım Faktörü Katsayısı (Yıl)				
		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
IP2X	Yüksek	0.53	0.48	0.45	0.43	0.42
	Orta	0.62	0.58	0.56	0.54	0.53
	Düşük	0.82	0.80	0.79	0.78	0.78
IP5X	Yüksek	0.89	0.87	0.84	0.80	0.76
	Orta	0.90	0.88	0.86	0.84	0.82
	Düşük	0.92	0.91	0.90	0.89	0.88
IP6X	Yüksek	0.91	0.90	0.88	0.85	0.83
	Orta	0.92	0.92	0.89	0.88	0.87
	Düşük	0.93	0.93	0.91	0.90	0.90

3.2 Lümen bakım faktörü

LBF, Işık kaynağındaki performans kaybına denir. Armatürün kirlenmeye karşı koruma sınıfına (IP) ve çevrenin kirliliğine bağlıdır. Kullanım süresine bağlı olarak, tünel içinde 24 saat boyunca aydınlatma yapan 100 W HPS lambalar için performans kaybını gösteren üretici firma kataloğundan alınır (Protek, 2017; Master T Son Apia, 2018). Buna göre 1. yıl 8766 saat, 2. yıl 17532 saat ve 3. yıl 26298 saatlik kullanım süresi sonundaki ışık akısındaki düşüş sırasıyla %6, %10 ve %13 olarak tespit edilmiştir.

3.3 Canlılık faktörü

Canlılık Faktörü (CF), ışık kaynağının, belirlenen bakım periyodu için canlı kalma oranına denir. Armatür Bakım Faktörü (ABF) armatür özelliği ve çevresel etkilere azalan ışık akısının başlangıç ışık akısına oranıdır. Aydınlatma yapılan yerlerde arızalanan her lambanın anında değiştirilmesi durumunda, CF=1 kabul edilir. Yani başka bir deyişle %100 olarak hesaba katılır. Ancak, bu uygulamada mümkün olamamaktadır. Periyodik zamana aralığında toplu veya grupsal değişimler yapılabilmektedir. Toplu lamba değişimi için öngörülen azami lamba sönme oranı %10 olarak benimsenen bir yerde tüm lambaların değişimi %10 sönme gerçekleştiğinde yapılır (Master T Son Apia, 2018).

Tablo 2'ye göre lambalarının tünel iç bölgesinde kullanım süresine bağlı olarak CF, 1 yıllık çalışma süresi 8766 saate, 2 yıllık çalışma süresi 17532 saate ve 3 yıllık çalışma süresi 26298 saate denktir. Lamba canlılık eğrisine göre, %10 sönme oranı 3. yıldan sonra gerçekleşmiştir. %10 sönme oranına ulaşan lambalar 3 yıldan fazla kullanımın mümkün olmadığını göstermektedir.

3.4 Optik etki

Optik etki (OE), LED'li armatürlerde, bakım faktörünün belirlenmesinde yüksek ısıya maruz kalan lenslerin sebep olacağı %5'lik kayıplar ihmal edilmemelidir (IEC 62717, 2014; IEC 62722-1, 2014). LED kaynaktan çıkan ışığın yönlendirilebilmesi için lensler kullanılmaktadır. Reflektörlerden farklı olarak lenslerin ışık geçirgenliği zamanla azalır. OE, LBF'ye ilave edilerek kullanılır. Bu parametrelerin çarpımıyla BF hesabı denklem 2'e göre yapılır.

$$BF = ABF * LBF * CF \quad (2)$$

4. Tünel Aydınlatmasında Bakım Faktörünün Tayini

Bu çalışmada tünel içinde 6 m yüksekliğe ikili şekilde takılan Yüksek Basıncılı Sodyum Buharlı (YBSB) 100 W lambalı armatürler kullanılmıştır. YBSB lambalı armatürler için bakım faktörü Lümen Bakım Faktörü, Canlılık Faktörü ve Armatür Bakım Faktörü gibi üç ana unsurun çarpımıyla denklem 2'ye göre hesaplanmıştır. 100 W gücünde, YBSB lambalı armatür IP65 koruma sınıfında seçilmiştir (Master T Son Apia, 2018). Buna göre 40.000 saat çalışma süresine sahip bir YBSB lambaya ait çalışma süreleri ve yıllara göre oluşan lamba lümen bakım faktörleri Tablo 2'de görülmektedir. Tablo 3'te YBSB lambalı tünel aydınlatma bakım faktörü ve gerekli minimum aydınlık düzeyi görülmektedir.

Tablo 2. YBSB lambaya ait çalışma süreleri ve yıllara göre oluşan LBF

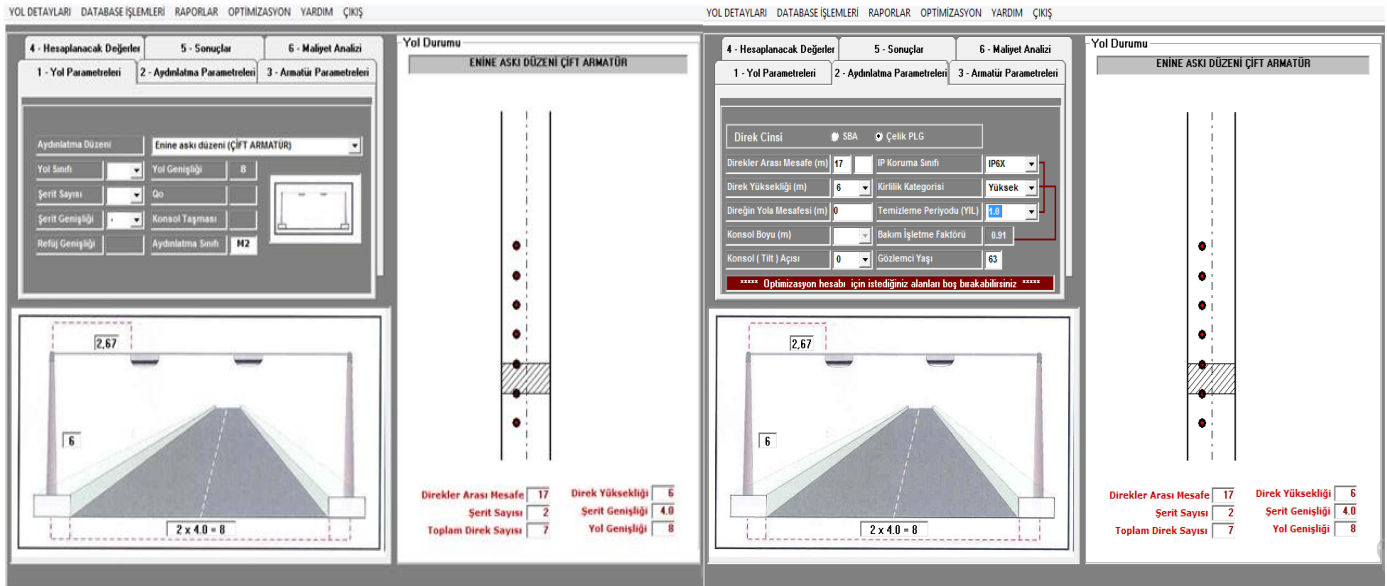
Yıl	Çalışma Süresi	LBF
1	8.766	0.98
2	17.532	0.97
3	26.298	0.90

Tablo 3. YBSB lambalı tünel aydınlatma bakım faktörü ve gerekli minimum aydınlık düzeyi

Yıl	IP65-Yüksek Kirlilikte ABF	CF	LBF	BF ($BF = ABF * LBF * CF$)	E%
1	0.91	0.99	94	0,8468	1.1810
2	0.91	0.98	90	0,8026	1.2460
3	0.91	0.90	87	0,7125	1.4035

5. Tünel Aydınlatması Tasarımı

Uluslararası standartlarda ve ilgili literatürde yol tipleri tanımlanmış olup uyulması gereken standartlar CIE raporlarında verilmektedir. Bu çalışmaya temel oluşturan standartlar CIE 88-2004'e göre hazırlanmıştır (CIE-88, 2004). Fotometrik değerleri bilinen armatürler ile gerekli tasarım hesapları yapılmalı, armatür sayısı ve tipi bu hesaplara göre saptanmalıdır. Kullanılan simülasyon programındaki pencereler üzerinde yol parametrelerine yönelik çeşitli seçimler yapılabilmektedir. Yol parametreleri penceresi altında aydınlatma düzeni (karşılıklı, kaydırılmış, refüjlü yol, refüjsüz yol, tek armatürlü tünel yolu, iki armatürlü tünel yolu gibi), yol sınıfı (R1, R2, R3, R4, N1, N2, N3, N4 gibi), şerit sayısı, şerit genişliği, refüj genişliği, aydınlatma sınıfı (M1, M2, M3, M4, M5, M6 gibi) seçimler yapılabilmektedir. Aydınlatma parametreleri penceresi altında direk veya askı düzeni aydınlatma için, armatürler arası mesafe, armatürün yerden yüksekliği, armatürün yola mesafesi, konsol açısı, IP koruma sınıfı, kirlilik oranı, temizleme periyodu, bakım faktörü gibi özellikler seçilmektedir. Armatür parametreleri penceresinde ise armatür adı, açısı, kullanılan lambanın gücü, kullanım ömrü, ışık akısı, balast gücü görülmekte olup, istenildiğinde Database işlemleri başlığı altında yeni lambalarda bu simülasyona eklenebilmektedir. Bu sayede istenilen her türlü lambanın simülasyona eklenmesi mümkün olabilmektedir. Sonuçlar penceresinden de veri girişi yapılan aydınlatma düzenine yönelik kolay ve hatasız bir hesaplamaya ulaşılmaktadır (Onaygil, 1998; Güler ve Onaygil, 2002; Onaygil, 2007; Ayaz ve ark., 2019). Şekil 3'te Yol ve aydınlatma parametrelerine ait örnek veri giriş ekranları görülmektedir (Onaygil, 2007).



Şekil 3. Yol ve aydınlatma parametrelerine ait örnek veri giriş ekranları

5.1 Tünel yol aydınlatma parametreleri

Yol kaplaması asfalt olup, sınıfı R3'tür. $Q_0=0.07$, duvar kaplaması beton, duvar yansıtma katsayısı 0.4, armatür yüksekliği 6 m'dir. Tasarımı yapılan tünele ait Tünel yol ve aydınlatma parametreleri Tablo 4'te görülmektedir.

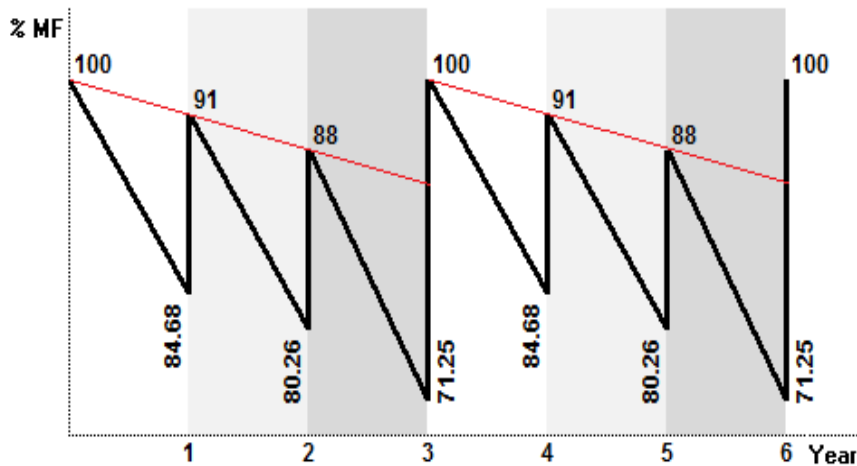
Tablo 4. Tünel yol ve aydınlatma parametreleri

Tünel aydınlatma düzeni:	
Enine askı düzeni (Çift Armatürlü)	
Yol sınıfı	M2
Yol Şerit Sayısı	3
Yol Şerit Geniliği	3.5
Yol Geniliği	10.5
Yol Sınıfı	R3
Q _o	0.07
Direkler arası mesafe	15
Yükseklik	6
BF (IP65-Yüksek kirlilik)	0.91
Armatür Tipi	YBSB
Armatür Açısı	0
Lamba Gücü	100
Işık Akısı	8346

6. Materyal ve Yöntem

Yol aydınlatma hesabında Noktasal Aydınlatma Hesabı Yöntemi kullanılmıştır (Özkaya, 1994). Bu yöntemde öncelikle noktasal aydınlatma hesabı yapılacak alan seçilir. Hesap alanı olarak iki direk arasındaki alan tespit edilir. Hesap alanındaki ilk armatürden başlayarak 60 m geriye doğru ve her şeridin ortasında duracak şekilde konumlandırılan gözlemciye göre noktasal hesaplama yapılır. Yol yüzeyindeki bir noktanın aydınlık düzeyi hesabı içinse bir noktaya gelen yatay aydınlık düzeyine tüm lambalardan gelen ve bu noktada oluşan aydınlık düzeylerinin toplamına eşittir. (Cengiz, 2019).

Bu çalışmada tünel içinde 3 şeritlik yol boyunca yatay ve dikey konumda seçilen 90 nokta üzerinde simülasyon yardımıyla ölçüm ve hesaplama yapılarak seçilen noktaların aydınlık düzeyi değerleri tablo 5'e işlenmiştir. Bu yaklaşımda aydınlatma elemanlarının 3 yıllık çalışması sonrası meydana gelen performans kaybı dikkate alınmamıştır. Standart bakım faktörü etkisine göre simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Ancak gerek tozlanma gerekse lambaların devamlı çalışması sonucu ekonomik ömürlerin dolması yani elektriksel elemanların yaşlanması etkisi nedeniyle ekstra bir bakım faktörü oluşmaktadır. Yani aslında standart BF etkisinde birçok etki dikkate alınmamaktadır. Bunun yerine detaylandırılmış BF etkisine göre yeni BF hesaba katılınca %E değerinin %140.35 oranında olması gerektiği anlaşılmaktadır. Şekil 4'e göre detaylandırılmış BF etkisi bağlı %140.35 oranında olmalıdır. Şekil 3'te 100 W YBSB armatürler için kullanıma bağlı optik performans değişimi görülmektedir (Cengiz ve Cengiz 2019).



Şekil 4. 100 W YBSB armatürler için kullanıma bağlı optik performans değişimi (Cengiz ve Cengiz 2018).

Buna göre Şekil 4 incelendiğinde;

- 1. yılın sonunda MF, %84.68'e düşmekte iken armatür camlarında yapılan temizlik ile MF, %91'e yükselmektedir. 1. yılın sonunda %E değeri %15.32 kayıp yaşamaktadır. Yılın sonundaki kaybı tolere etmek için E değeri %18.10 daha fazla olmalıdır.

- 2. yılın sonunda MF %80.26'e düşmekte iken armatür camlarında yapılan temizlik ile MF %88'e yükselmekte, 2. yılın sonunda %E değeri %19.74 kayıp yaşamaktadır. 2. yılın sonundaki kaybı tolere etmek için E değeri %24.60 daha fazla olmalıdır.
- 3. yılın sonunda %71.25'e düşmekte iken armatür camlarında yapılan temizlik yeterli olmadığından tüm lambalar değiştirilmelidir. BF 3. yılın sonunda lambalardaki ışık akısı azalması nedeniyle aydınlık düzeyindeki düşüşün tolere edilemez hale gelmesi nedeniyle tüm lambalar değiştirilmelidir.
- E_{ort} düzenli olarak azalmıştır. E_{ort} 1. yılda %100 ile başlamışken 2. yılda %91 ve 3. yılda %88'in altına düşmüştür. Buna göre tünel aydınlatmasında 24 saat esaslı olarak çalışan lambalar 3. yılın sonunda komple değiştirilmelidir. Çünkü lamba canlılık eğrisine göre, %10 sönme oranı 3. yıldan sonra gerçekleşmiştir. %10 sönme oranına ulaşan lambalar 3 yıldan fazla kullanımın mümkün olmadığını göstermektedir.
- Tablo 3 incelendiğinde %E değerlerinin 1. yılda %118.10 daha fazla olması gerekirken, 2. yılda %E değerinin %124.60 daha fazla olması gerektiği ve kullanımın sona ereceği yani tüm lambaların değişiminin yapılacağı yıl olan 3. yılda %E değerinin %140.35 oranında olması gerektiği görülmektedir. Yani tünel aydınlatma sistemi ilk çalışmasında devreye girerken %E değeri optimum olarak seçilmiş olsada aslında bu oran hatalı bir orandır. Çünkü zamanla %E oranında azalmalar olduğu Tablo 3'ten görülmektedir. Tablo 3'e göre 3 yıllık çalışmanın sonunda tünel aydınlatması BF çarpanı %71.25'e düşmekte yani $\%E=1/0.7125=\%140.35$ oranına ulaşmaktadır. Bu nedenle simülasyondaki E değerlerine yıllara göre oluşan bakım faktörü etkisi ilave edilerek doğru sonuca ulaşılabilir.

Tablo 5'te Standart BF hesabına göre 90 noktaya ait aydınlık düzeyi değerleri görülmektedir.

Tablo 5. Standart BF hesabına göre 90 noktaya ait aydınlık düzeyi değerleri

Konum Dikey/ Yatay	0,750	2,250	3,750	5,250	6,750	8,250	9,750	11,250	12,750	14,250
0,583	79,88	56,24	41,23	35,74	35,16	35,16	35,74	41,24	56,24	79,89
1,750	57,16	41,20	30,75	24,53	25,27	25,27	24,53	30,76	41,20	57,17
2,917	36,43	28,86	24,10	19,22	19,12	19,12	19,22	24,10	28,86	36,44
4,083	25,78	22,16	18,89	16,76	16,39	16,39	16,76	18,89	22,16	25,78
5,250	22,98	20,19	17,07	15,93	15,57	15,57	15,93	17,07	20,20	22,98
6,417	25,78	22,16	18,89	16,76	16,39	16,39	16,76	18,89	22,16	25,78
7,583	36,43	28,86	24,10	19,22	19,12	19,12	19,22	24,10	28,86	36,44
8,750	57,16	41,20	30,75	24,53	25,27	25,27	24,53	30,76	41,20	57,17
9,917	79,88	56,24	41,23	35,74	35,16	35,16	35,74	41,24	56,24	79,89

Tablo 5'e %E değeri tolerans oranı olan %40.35 ilave edilince Tablo 6 elde edilir. Tablo 6'da detaylandırılmış BF hesabına göre 90 noktaya ait aydınlık düzeyi değerleri ve Tablo 7'de standart ve detaylandırılmış BF hesabına göre genel sonuçlar görülmektedir.

Tablo 6. Detaylandırılmış BF hesabına göre 90 noktaya ait aydınlık düzeyi değerleri

Konum Dikey/ Yatay	0,750	2,250	3,750	5,250	6,750	8,250	9,750	11,250	12,750	14,250
0,583	112,11	78,93	57,87	50,16	49,34	49,35	50,16	57,87	78,94	112,12
1,750	80,23	57,82	43,16	34,43	35,46	35,46	34,43	43,17	57,82	80,24
2,917	51,13	40,50	33,82	26,97	26,83	26,83	26,97	33,83	40,51	51,14
4,083	36,18	31,10	26,51	23,52	23,00	23,00	23,52	26,52	31,10	36,18
5,250	32,25	28,34	23,95	22,36	21,85	21,85	22,36	23,95	28,35	32,25
6,417	36,18	31,10	26,51	23,52	23,00	23,00	23,52	26,52	31,10	36,18
7,583	51,13	40,50	33,82	26,97	26,83	26,83	26,97	33,83	40,51	51,14
8,750	80,23	57,82	43,16	34,43	35,46	35,46	34,43	43,17	57,82	80,24
9,917	112,11	78,93	57,87	50,16	49,34	49,35	50,16	57,87	78,94	112,12

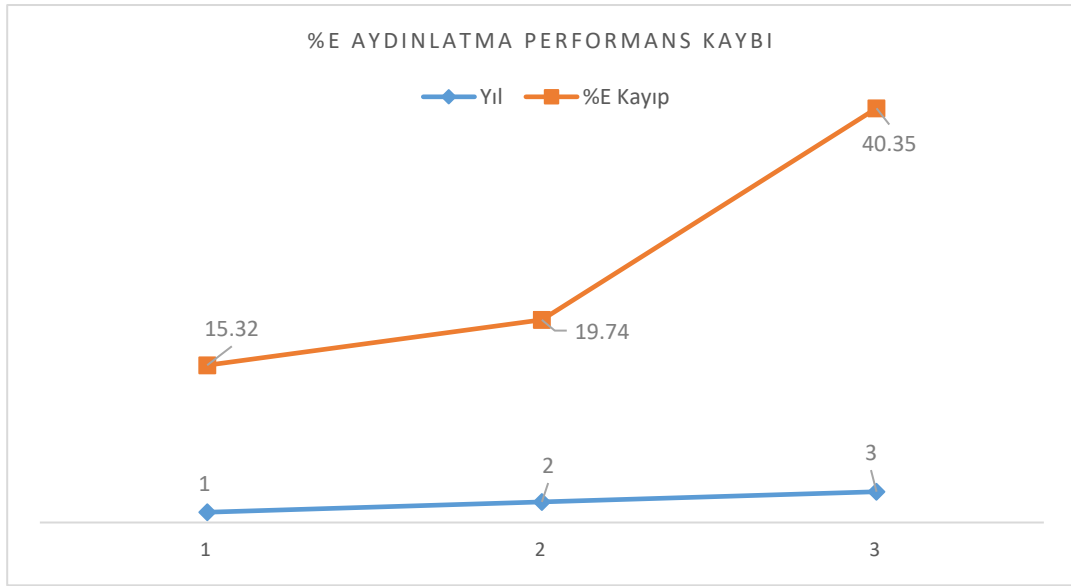
Tablo 7. Standart ve detaylandırılmış BF hesabına göre genel sonuçlar

Genel Sonuçlar	Standart BF	Detaylandırılmış BF
Emin	15,56	21,84
Emax	79,89	112,13
Eort	31,14	43,70
Uoa	0,50	0,70
Ula	0,19	0,27
Sr	1,09	1,53

7. Sonuçlar

Gün boyunca sürekli olarak enerji tüketen tünel aydınlatma sistemlerinde yol aydınlatmalarına göre yaklaşık 3 kat daha fazla yıpranma ve performans kaybı görülmektedir. Aydınlatma aygıtlarında en düşük performansa inme durumunda dahi, tünel içinde yeterli aydınlatma sağlanmalıdır. Çünkü tünel aydınlatmalarından kaynaklanabilecek kaza riskleri en aza indirmek için her türlü koşulda minimum aydınlatmayı sağlayacak bir aydınlatma tasarımı oluşturulmalıdır. Bu amaçla öngörülen performans düşümünün sistem performansına eklenerek hesaplama ve simülasyon çalışması yapılmıştır.

Tünel BF tespitine yönelik olarak öngörülemez olumsuz koşullardan bir veya birkaçının oluşması nedeniyle detaylandırılmış BF hesaplanırsa; 1. yılda %E değerinde %15.32, 2. yılda %19,74 ve 3. yıl sonunda %40.35 oranında performans kaybı yaşanır. Şekil 5'te yıllara göre aydınlatmada oluşan performans kaybı görülmektedir.



Şekil 5. Yıllara göre aydınlatmada oluşan performans kaybı

Tünel aydınlatması ilk kez tasarlanırken veya lamba değişiminin olduğu komple bakım yapılırken 3 yıllık bir tünel aydınlatmasında aydınlık düzeyi %40.35 oranında tolerans payı bırakılarak tünel aydınlatması yapılmalıdır. Simülasyon sayesinde farklı senaryo ve ihtimaller için kolaylıkla hesaplama yapılabilmektedir. Tünel aydınlatmasında YBSB lamba gücü 100 W olarak seçilmiş olsa da, bir üst lamba tipi olan 150 W'lık YBSB lamba kullanılmalıdır. Ancak bu şekilde tünel aydınlatması için gerekli tolerans payı bırakılmış olur.

References

Arı, D. Çıbuk, M. Ağgün, F. (2017) Effect of relay-priority mechanism on multi-hop wireless sensor networks, Bitlis Eren University Journal of Science and Technology, 7(2), 145–153.

Ayaz, R. Ozcanli, A.K. Nakir, I. Bhusal, P. Unal, A. (2019) Life Cycle Cost Analysis on M1 and M2 Road Class Luminaires Installed In Turkey. Light Engineering, 27(1), 61-47.

Cengiz, M.S. (2019) A Simulation and Design Study for Interior Zone Luminance in Tunnel Lighting, Light Engineering, 27(2).

- Cengiz, M.S. (2014) Evaluation of Smart Grids and Turkey. *Global Advanced Research Journal of Engineering Technology and Innovation*, 3(7), 149-153.
- Cengiz, M.S. (2013) Smart meter and cost experiment. *Przeglad Elektrotechniczny*, 89(11), 206-209
- Cengiz MS. & Cengiz Ç. Numerical Analysis and An Application Study on Maintenance Factor in Tunnel Lighting, *Journal of Engineering and Technological Sciences*.(In press)
- Cengiz, M.S. Mamiş M.S. (2015) Endüstriyel tesislerde verimlilik ve güneş enerjisi kullanımı. VI. Enerji Verimliliği Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi, 21-25. 4-6 Haziran 2015, Sakarya, Türkiye
- Cengiz, M.S. Mamiş M.S. (2015) Solution Offers For Efficiency and Savings in Industrial Plants. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology* 5(1), 24-28.
- Cengiz, M.S. Mamiş, M.S. (2015) Price-efficiency relationship for photovoltaic systems on a global basis, *International Journal of Photoenergy*, 2015(2015), 1-12.
- Cengiz, M.S. Mamiş, M.S. Yurci, Y. (2018) Providing electrical power increase by stimulating temperature difference at low temperatures in Stirling motors, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36(1), 86-97.
- CIE, "CIE 154-The Maintenance of Outdoor Lighting Systems, 2003.
- CIE Technical Report-88-2004. "Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses [R]", 2004.
- CREE, SSL Design Processes/Considerations, (2009) Available from:www.cree.com ABD, (Accessed 09.09.2017).
- Çıbuk, M. Balık, H.H. (2011) A novel solution approach and protocol design for bio-telemetry applications. *Advances in Engineering Software*, 42(7), 513-528.
- Efe SB, Cebeci M, 2013. Power flow analysis by Artificial Neural Network, *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2 (6): 204-208.
- Efe SB. Cebeci M. 2015. Mikro Şebekenin Farklı İşletme Koşulları Altında İncelenmesi, 6. Enerji Verimliliği Kalitesi Sempozyumu, 4-6 Haziran 2015, Sakarya, Türkiye
- Eren, M., Kaynaklı, M., Yapıcı, I., Gencer, G., Yurci, Y., Cengiz, Ç. (2017) Numerical Analysis of Maintenance Factor for Tunnel and Road In Solid State Lighting", *International Conference on Multidisciplinary, Science, Engineering and Technology*, Bitlis, Turkey, October 27-29, 2017. Bitlis.
- Ertugrul, Ö.F. (2011) Enerji Verimliliği Çalışmaları ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Bölgede Kullanılabilirliği ve Yatırım Olanakları, Batman, Siirt, Şırnak İlleri Enerji Forumu.
- Gencer, G. Eren, M. Yildirim, S. Kaynaklı, M. Palta, O. Cengiz, M.S. Cengiz, Ç. (2017) Numerical Approach to City Road Lighting Standards, *International Conference on Multidisciplinary, Science, Engineering and Technology*, Bitlis, Turkey, October 27-29, 2017, Bitlis
- Gil-Martín, L.M. Gómez-Guzmán, A. Peña-García, (2015) Use of diffusers materials to improve the homogeneity of sunlight under pergolas installed in road tunnels portals for energy savings, *Tunnel Undergr. Space Technol.* 48, 1, pp.123-128.
- Güler Ö. & Onaygil S. (2002) The effect of luminance uniformity on visibility level in road lighting, *Lighting Research Technology*, 35: 199-215.
- IEC 62717, (2014) LED module for general lighting. Performance requirements, 2014
- IEC 62722-1, (2014) Luminaire performance-Part 2-1 : Particular requirements for LED luminaries, 2014
- Master Son-T Apia Plus-Xtra, HPS-100, (2018) Available online at: http://www.lighting.philips.com/main/prof/conventional-lamps-and-tubes/high-intensity-discharge-lamps/son-highpressure-sodium/master-son-t-apia-plusxtra/92815021_EU/product, (Accessed on 09.05.2018).
- Onaygil, S. (1998) Yol aydınlatma projelerinde yol sınıfının belirlenmesinin önemi, *Kaynak Elektrik Dergisi*, 12: 125-132.

Onaygil S. (2007) TEDAŞ Genel Müdürlüğü Meslek İçi Eğitim Semineri-Gölbaşı Eğitim Tesisleri, Yol aydınlatma Semineri 23-24 Ocak 2007.

Onaygil S. (2007) TEDAŞ Genel Müdürlüğü Meslek İçi Eğitim Semineri, TEDAŞ Basımevi, Ankara, 1-70.

Olga N. Ryzhik, A.A.V. Shajdullina V.K. (2019) Alternative Ways of Attracting Investments in the Energy Saving Technologies Industry. *Light Engineering*, 27(1), 103-108.

Özkaya, M. (1994) *Aydınlatma Tekniği*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 91.

Protek Company Catalog, (2017). Available from: <http://www.protekproje.com/downloads/ProtekProjeCompanyCatalogTR.pdf>, (Accessed on 09.05.2018).

Ruchkina G.F. Matveeva, E.Y. (2019) Energy Saving in the Sphere of State Public Interests. *Light Engineering*, 27(1), 97-102.

TSE standard: TS EN 13201-2, Road lighting - Part 2: Performance requirements (Effective date: 09.12.2016).



Yapay Sinir Ağı Eğitim Algoritmaları ile İki Yönlü Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakalarda Termal Gerilme Analizi

Thermal Stress Analysis in Two-Directional Functionally Graded Plates with Artificial Neural Network Training Algorithms

Munise Didem Demirbaş¹ , Didem Çakır² 

¹Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kayseri, TÜRKİYE

²Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 23/10/2018

Kabul/Accepted: 05/03/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin (FKM) henüz seri üretiminin yapılmaması nedeniyle hacimsel dağılımının belirlenmesi oldukça önemlidir. Çünkü hacimsel dağılımın belirlenmesi ile malzemenin emniyetli gerilme sınırları belirlenmektedir. FKM yüksek sıcaklık tesirinde kullanılmakta olup termal gerilme sınırları oldukça önemli olmaktadır. Termal gerilme dağılımının ve seviyelerinin hesaplanması için ise sayısal analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, 2B-FK plakaların ısı akısı tesirindeki termo-mekanik davranışının tespitindeki en önemli parametre olan eşdeğer gerilme seviyeleri için hacimsel dağılıma bağlı modeller sonlu farklar metodu (SFM) kullanılarak oluşturulmuştur. Bu modeller yapay sinir ağına (YSA) üç farklı eğitim algoritması ile elde edilmiştir.

Çalışmamızda, 2B-FK plakaların mevcut şartlar için farklı kompozisyonel gradyant üst değerlerin de eşdeğer gerilme seviyesinin belirlenebileceği modeller sunulmuştur. Bu modeller vasıtasıyla SFM göre 340 kat daha hızlı çözüm elde edilmektedir. Önerilen modeller henüz seri üretimi gerçekleştirilemeyen FKM hem üretiminde hem de yapılacak teorik çalışmalarda optimum hacimsel dağılıma ulaşmak için yol gösterici olacaktır. Yapılan çalışmada farklı eğitim algoritmaları için eğitim aşamaları, performans değerleri ve işlevsellikleri detaylı olarak incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler

“2D-FKP, Yapay Sinir Ağı, Eğitim algoritmaları”

Abstract

It is very important to determine the volumetric distribution because Functionally Graded Materials (FGMs) are not mass-produced at present. By determining the volumetric distribution, the allowable stress limits of the material are also determined. FGMs are used in high temperature effects so thermal stress limits become very important. For the calculation of thermal stress distribution and levels, numerical analysis methods are used. In this study, the models based on volumetric distribution for the equivalent stress levels, which are the most important parameter for the determination of the thermo-mechanical behavior of the 2D-FG plates, were formed by using the finite difference method (FDM). These models were obtained by three different training algorithms in artificial neural network (ANN).

In this study, the models which can determine the equivalent stress level of different composition gradient exponent values for the existing conditions of the 2D-FGs are presented. These models provide 340 times faster solution than the FDM. Suggested models will be the guide to reach the optimum volumetric distribution in both production and theoretical studies of FGMs which cannot be mass-produced yet. In the study, the training stages, performance values and functionality of different training algorithms are examined and interpreted in detail.

Key Words

“2D-FGM, artificial neural network, training algorithms”

1. Giriş

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (FKM) yüksek sıcaklık malzemesi olarak bundan üç dekat önce ortaya çıkmıştır. Bu malzemelerin bir tarafı metal diğer tarafı seramik olmak üzere geçiş bölgesi bir hacimsel fonksiyona bağlı olarak değişmektedir. Bu hacimsel fonksiyon seramikten metale yada metalden seramiğe geçişin hızını belirlemekte olup termo-mekanik performans ile oldukça ilgilidir. Bu sebepten birçok çalışma farklı mekanik tesir altındaki hacim oranının belirlenmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler iki veya daha fazla malzemenin malzeme özelliklerinden faydalanılarak, makro ya da mikro yapıda birleşmesi ile meydana gelir. FKM'lerdeki ara yüzey çatlakları minimum seviyeye indirgenmiştir (Shabana ve Noda, 2001). FKM'lerde hacimsel dağılımın belirlenmesi için kompozisyonel gradyant üst değerinin belirlenmesi gerekir ve literatürde pek çok çalışma bu alanda odaklanmıştır (Koizumi ve Niino, 1995). Literatürdeki fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin optimum kompozisyonunun belirlenmesi ile ilgili çalışmaların bazıları aşağıda verilmiştir.

Cho ve Ha, (2002) fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin termal yüklemeye altındaki termo-elastik davranışını sonlu farklar metodunu kullanarak incelediler. Farklı sınır şartları için iki boyutlu hacimsel dağılımın optimum değerini bulmayı amaçladılar. Ara yüzeylerdeki en yüksek gerilmeyi minimize etmek için YSA yöntemi ile model sundular. Moitaa ve arkadaşları, (2018). sayısal yöntem olarak sonlu elemanları kullanarak FKM'lerin yapısal dağılımını belirlediler. Analiz sonuçlarını kullanarak YSA'da model oluşturdular. Ootao ve arkadaşları, (1999) içi boş bir kürenin malzeme kompozisyonunun termal yüklemeye altında optimizasyonunu yaptılar. Optimizasyon yöntemi olarak yapay sinir ağı yöntemini kullandılar. YSA'nın doğruluğunu ölçmek için literatürde yaygın olarak kullanılan doğrusal olmayan programlama ile karşılaştırdılar. İlk verileri oluşturduktan sonra YSA'nın optimum sonuca hızlı ulaştığını tespit ettiler. Nemat-Alla, (2003) yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilmesi için iki boyutlu fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin geliştirilmesi için çalıştı. Termal gerilme analizinde sonlu elemanlar yöntemini kullandı. Uza ve havacılık sanayisinde ihtiyacı karşılayacak optimum tasarımı sundu. Xu ve You, (2013) fonksiyonel kademelendirilmiş boruların Legendre yöntemi ile kritik frekansını hesapladılar. Optimizasyon yöntemi olarak YSA'yı kullandılar. Kurdukları modelde eğitim algoritması olarak Levenberg-Marquart algoritmasını kullandılar. Kompozisyonel gradyant üst değerinin gerçek değeri ile tahmini değerlerin oldukça yakın olduğunu ifade ettiler. Jodaei ve arkadaşları,(2012) üç boyutlu fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar da sayısal yöntem olarak State-Space Based Differential Quadrature Metodu kullandılar. Optimum malzeme kompozisyonuna ulaşmak için YSA ile model kurdular. Demirbaş ve Çakır, (2018) fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların optimum hacim oranını bulmak için YSA yöntemini kullandılar. Kurdukları modelin gerçek değerlere yakın olduğunu vurguladılar. Do ve arkadaşları, (2019) kalınlık yönünde fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın burkulma ve serbest titreşim analizini yaptılar. Derin sinir ağı yöntemi ile modifiye simbiyotik organizma arama algoritmasını birleştirerek model kurdular. Yaptıkları çalışmayı izo-geometrik analiz ve modifiye simbiyotik organizma algoritmasında karşılaştırdılar ve kurdukları model ile optimizasyon sürelerinde önemli ölçüde tasarruf sağladılar. Salavati ve arkadaşları, (2015) fonksiyonel kademelendirilmiş yapıların kritik kırılma yükünü bulmayı amaçladılar. Sayısal yaklaşım olarak Strain Energy Density (SED) yöntemini kullandılar. Kritik kırılma yükünü belirlemede YSA yönteminin kullanışlı olduğunu ve iyi sonuçlar elde ettiklerini vurguladılar. Nazari ve arkadaşları, (2015) kompozit fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç dikdörtgen plakaların üç boyutlu doğal frekansı üzerine çalıştılar. Çalışmalarında Petrov-Galerkin ve YSA yöntemlerini uyguladılar. YSA yönteminde ise geriye yayılım algoritmasını tercih ettiler. Singh ve arkadaşları, (2015) Kompozit malzemelerin aşınma durumunu incelediler. Onlar kompozit ve fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeleri üretmek için mekanik karıştırma ve santrifüj tekniğini kullandılar. Geliştirdikleri malzemeleri Taguchi Yöntemi ve Varyans Analizi (ANOVA) ile analiz ettiler. Verileri doğrulamak için YSA'yı kullandılar. FKM'lerin üretilen tüm kompozitlere göre aşınma dirençlerinin iyi olduğunu buldular. Khsoshnoodi ve arkadaşları, (2016) çok yönlü kademelendirilmiş FKM'nin dinamik analizi için yarı analitik yöntem kullanarak nicel değerlere ulaştılar. SSDQM ile YSA yöntemini karşılaştırdılar. Başlangıçta verilere ulaşma zamanını dikkate almadan YSA'nın daha pratik olduğunu buldular.

2. Malzeme ve Metot

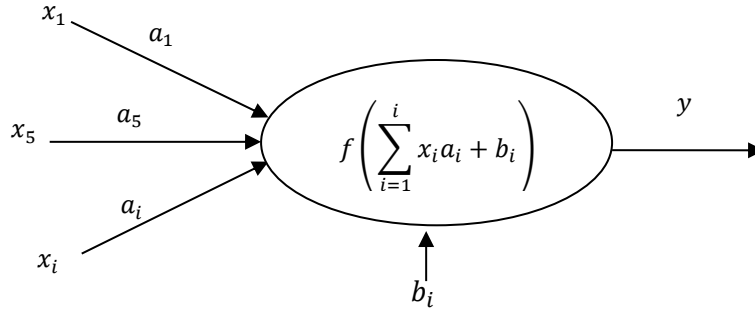
2.1 Fonksiyonel Kademelendirilmiş Malzemeler

Programlama ve bilişim teknolojilerinin ilerlemesi ve analiz yöntemlerinin gelişmesi ile birlikte malzeme teknolojisinde ileri düzeyde inovasyon ve yapısal varyasyon imkanları artmış ve pek çok ihtiyacı karşılayabilecek malzemeler üretilmiştir. Geleneksel malzemelerden farklı olan bu özel malzemelerden biri de fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerdir. Bu malzemeler yüksek sıcaklık tesirinde iyi mekanik dayanıma sahip olacak ve geçiş bölgesinde minimum ısı ve mekanik uyumsuzluk oluşturacaktır. Geleneksel kompozit malzemelerde katmanlar arasındaki geçiş bölgelerinde malzeme süreksizliklerine bağlı olarak ara yüzey çatlakları meydana gelmektedir. Kademelendirilmiş malzemelerle bu sorun ortadan kalkmış ve ara yüzey hataları önlenmiştir. FKM'lerde uygun yapısal özelliğinin sağlanabilmesi için seramikten metale veya metalden seramiğe geçiş bölgesinin hacim oranının yani kompozisyonel gradyant üst değerinin belirlenmesi oldukça önemlidir.

2.2 Yapay Sinir Ağı Algoritması (YSA)

Optimizasyon problemindeki zorluk seviyesi yükseldikçe optimum sonuca ulaşmak güçleşmekte ve zaman almaktadır. Bu sebeple problem çözümündeki zaman faktörünün önemi ve optimizasyon yönteminin yetersizliği gibi nedenlerle farklı optimizasyon teknikleri geliştirilmiştir. Bu nedenle geliştirilen optimizasyon yöntemlerinden biri de yapay sinir ağı algoritmasıdır. Yapay sinir

ağı, insan beyninin çalışma yapısında yer alan öğrenme, bilgi işleme, yöntem geliştirme ve karar verme gibi temel özelliklerin modellenmesi ve bilgisayar diline aktarılması yoluyla geliştirilmiştir (Öztürk, 2011). Yapay sinir ağı bu öğrenme özelliği sayesinde örneklerle ilgili bilgileri toplar ve yeni problem ile karşılaştırılınca öğrendiği bilgileri ağırlık katsayısı ile verilere uygulayarak problemler hakkında karar verir. Bu gelişmiş sinir ağı yöntemi uzay-havacılık sistemleri, askeri uygulamalar, finansal veri işleme, kontrol teknikleri, araştırma uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır.



Şekil 1. Basit bir yapay sinir hücresi

Şekil 1.'de yapay sinir ağı hücresinin basit bir gösterimi çizilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi hücreye giriş verileri toplam fonksiyonuna gönderilir. Literatürde birçok toplam fonksiyonu bulunmaktadır. Toplam fonksiyonlarından en çok kullanılan kümülatif toplam fonksiyonudur. Bundan dolayı çalışmamızda bu fonksiyon tercih edilmiştir. Toplam fonksiyonunda x, a ve b sırasıyla giriş değeri, ağırlık vektörü ve eşik değeridir.

$$net = \sum x_i a_i + b_i \quad (I)$$

Toplam fonksiyonundan üretilen değer aktivasyon fonksiyonuna aktarılır ve net girdi değeri üretilir. Literatürde pek çok aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır ve genellikle doğrusal olmayan sigmoid fonksiyonu tercih edilmiştir. Denklem II'de sigmoid fonksiyonu gösterilmiştir.

$$f(net) = \frac{1}{1 + e^{-net}} \quad (II)$$

Öğrenme işlemi ise, üretilen tahmini değerlerle gerçek değerler arasındaki hata değerinin hesaplanması ve bu hata değerinin beklenen hata düzeyine kadar devam etmesi işlemidir. Bu çalışmamızda ortalama kareli hata fonksiyonu, hata değerinin hesaplanması için seçilmiştir. Denklem III'de ise, hata fonksiyonunda (E), tahmini değer (y_d) ve gerçek değer (y) arasındaki fark hesaplanarak belirlenen uygunluk değeri hesaplanmaktadır.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^m (y_d - y)^2 \quad (III)$$

Momentum Katsayısı Geriye Yayılım Algoritması (Gradient Descent with Momentum Backpropagation (MGY)): Rumelhart ve arkadaşları tarafından geliştirilen bir öğrenme algoritması olan geriye yayılım algoritması nöronlarda gradyan azaltma tekniğini kullanmaktadır (Rumelhart D.E. ve arkadaşları (1986)). Rumelhart'ın bu algoritması geliştirilerek formülüne momentum katsayısı eklenerek momentum katsayılı geriye yayılım algoritmasını geliştirmiştir (Parlos ve arkadaşları, 2017). Denklem IV'de ise, momentum katsayılı geriye yayılım algoritmasının fonksiyonu verilmiştir. Burada α momentum katsayısıdır. Momentum katsayısı genelde $0 < \alpha < 1$ arasında belirlenir. Bu katsayının eklenmesi yakınsama hızını artırır ve yerel minimuma takılma olasılığını azaltır (Haykin. S. (2005)).

$$w_t = w_{t-1} + n \left(\frac{\partial E_t}{\partial w_{t-1}} \right) + \alpha \Delta w_{t-1} \quad (IV)$$

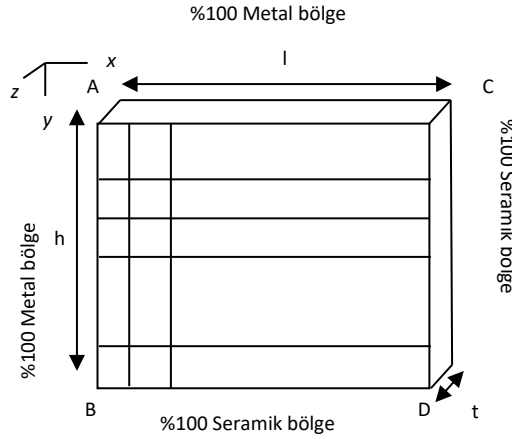
Adaptif Geriye Yayılım Algoritması (Gradient Descent with Adaptive Learning Rate Backpropagation (AGY)): bu algoritma geriye yayılım yönünde ağırlık değerlerini hata ve hata türevlerinin işlevi olan öğrenme oranını güncellemektedir. AGY'de kullanılan hata fonksiyonu aşağıda detaylandırılmıştır. Burada $p(E)$, hata fonksiyonudur (Parlos ve arkadaşları, 2017).

$$w_t = w_{t-1} + p(E) \left(\frac{\varphi_t}{\|\varphi_t\|^2} \right) \quad (V)$$

Momentumlu Adaptif Geriye Yayılım Algoritması (Gradient Descent with Momentum Adaptive Learning Rate Backpropagation (MAGY): Adaptif Geriye Yayılım Algoritması üzerinde değişiklikler yapılarak Momentumlu Adaptif Geriye Yayılım Algoritması (MAGY) oluşturulmuştur. Algoritmalar arasındaki fark n öğrenme katsayısı gradyanın karesi yerine kendisine bölümünden ibaret olmasıdır. Ayrık zaman aralığında bu algoritmanın, Adaptif Geriye Yayılım Algoritmasına göre daha iyi olduğunu tespit edilmiştir (Haykin, 2005). Denklem VI' de bu algoritmanın ağırlık fonksiyonu görülmektedir. Burada φ ise hata işlevinin ağırlık değerine göre türevidir.

$$w_t = w_{t-1} + n \left(\frac{\varphi_t}{\|\varphi_{t-1}\|} \right) \quad (VI)$$

3. YSA ile modelleme



Şekil 2. İki yönlü fonksiyonel kademelendirilmiş plaka

$$V_s(x, y) = \left(\frac{x}{l} \right)^n \left(\frac{y}{h} \right)^m \quad (VII)$$

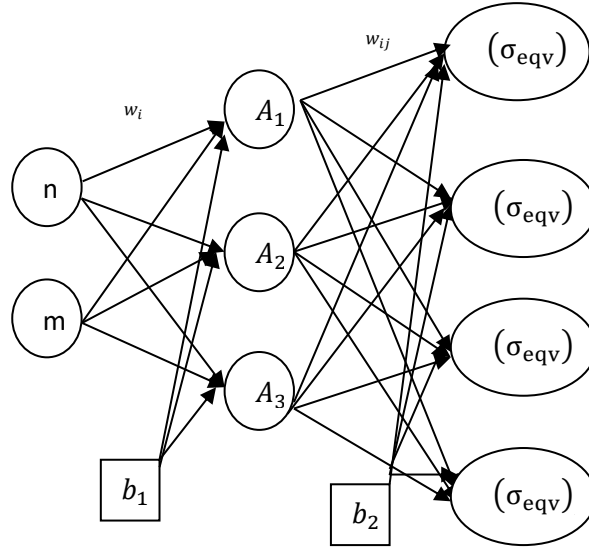
$$V_m(x, y) = 1 - V_s(x, y) \quad (VIII)$$

Denklem VII ve VIII'de sırasıyla V_s seramik, V_m metal hacimsel dağılımı temsil etmektedir. Kompozisyonel gradyant üst değerleri ise n ve m olup sırasıyla x - ve y - yönündedir.

Bu çalışmada bir tarafı seramik (ZrO_2) bir tarafı metal (Ti-6Al-4V) olmak üzere iki farklı malzemedan oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş dikdörtgen plaka kullanılmıştır. Bir kenarından düzlem içi ısı akısına maruz bırakılmış iki yönlü kademelendirilmiş plakanın termal gerilme analizinin sayısal sonuçları kullanılarak yapay sinir ağı ile hacim oranı için termal gerilme seviyelerini verecek modeller oluşturulmuştur. YSA'nın eğitim verilerine ulaşmak için sayısal bir yöntem olan sonlu farklar metodu ile nicel verilere ulaşılmıştır. Termo-mekanik analizde malzemenin dayanımını belirleyen en önemli kısıt eşdeğer gerilme seviyeleridir. Bundan dolayı eğitim setinde eş değer gerilme değerlerinin en büyüğünün en büyüğü (σ_{eqv})₁, en büyüğünün en küçüğü (σ_{eqv})₂, en küçüğünün en büyüğü (σ_{eqv})₃ en küçüğünün en küçüğü (σ_{eqv})₄ olmak üzere dört farklı gerilme değeri seçilmiştir. [0.0001-1.5] aralığında rastsal olarak seçilen 200 farklı n ve m kompozisyonel gradyant üst değerlerine karşılık gelen (σ_{eqv})₁, (σ_{eqv})₂, (σ_{eqv})₃, (σ_{eqv})₄ eş değer gerilme seviyeleri dikkate alınarak model oluşturulmuştur.

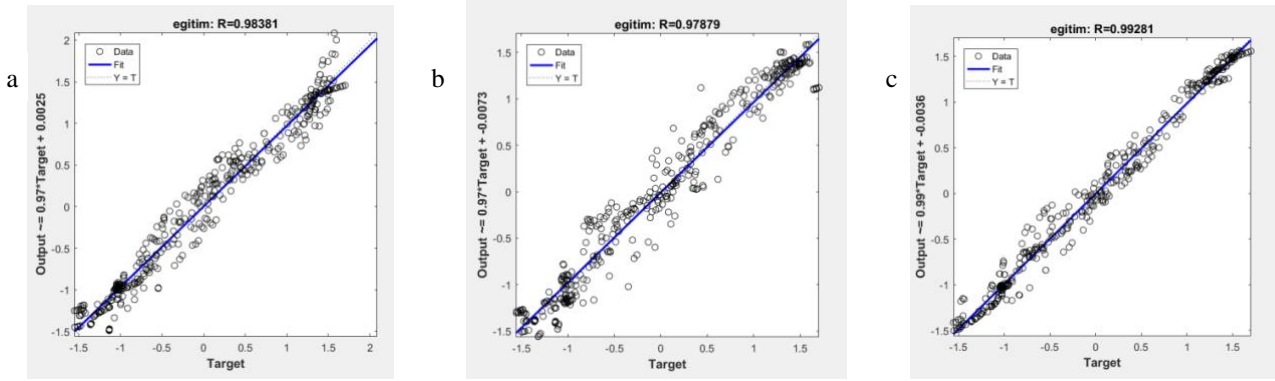
Dört farklı çıktı bulunmaktadır. Şekil 3. kurulan YSA modeline göre çizilmiştir. Çalışmamızda aşağıdaki gibi Şekil 3. ve çıktılar detaylı bir şekilde aşağıda açıklanmıştır.

Tek katmanlı algılayıcı model için üç nöronla kurulan YSA modeli daha iyi performans göstermektedir. Bu sebepten iki giriş (rastsal alınan n ve m değerleri) ve dört (eş değer gerilme) çıkış değeri olan, tek katmanlı ve üç nöronlu oluşan yapay sinir ağı modeli kurulmuştur. Sayısal yöntemde ulaşılan veriler yani data setleri yapay sinir ağının eğitilmesinde kullanılmıştır (Çakır, 2018).



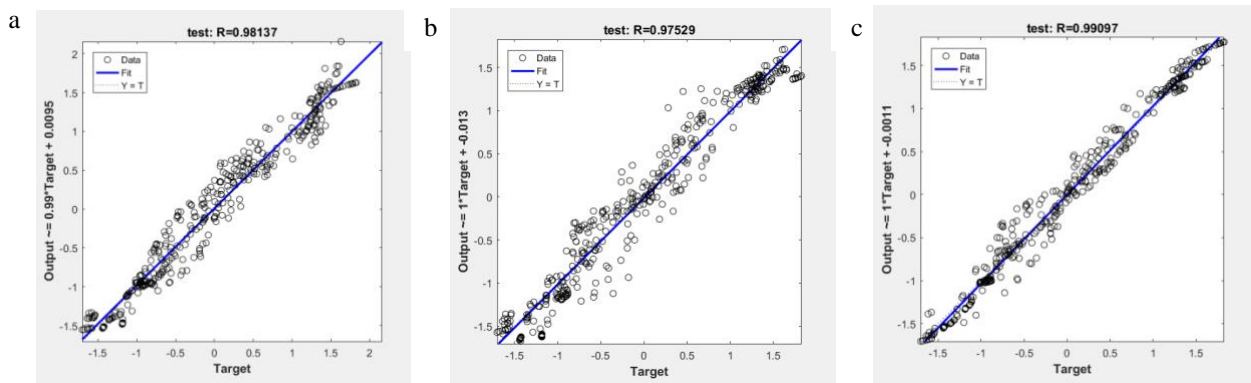
Şekil 3. İki yönlü fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın tek katmanlı yapay sinir ağı modeli

Programlama dilinde (Matlab,2009a) oluşturulan modelde analiz çalışmaları yapılmıştır. Yapay sinir ağı modelinde 200 verim� %50 eğitim seti, %50 test seti olarak kullanılmıştır. YSA'nın doğrulama oranı %10 ve maksimum çevrim sayısı 1000 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Yapay sinir ağıının eğitim tahmin değerleri a) MGY, b) AGY, c) MAGY

Şekil 4'te eğitim tahmin değerleri gösterilmektedir. MGY algoritması % 98.381, AGY algoritması % 97.879 ve MAGY % 99.281 doğrulukla çözüme ulaşmışlardır. Üç farklı algoritmanın eğitim işleminin sonlandıktan sonraki dağılımına bakıldığında gerçek değerlerle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Modellerin performans değerleri beklenen değeri karşılamıştır.

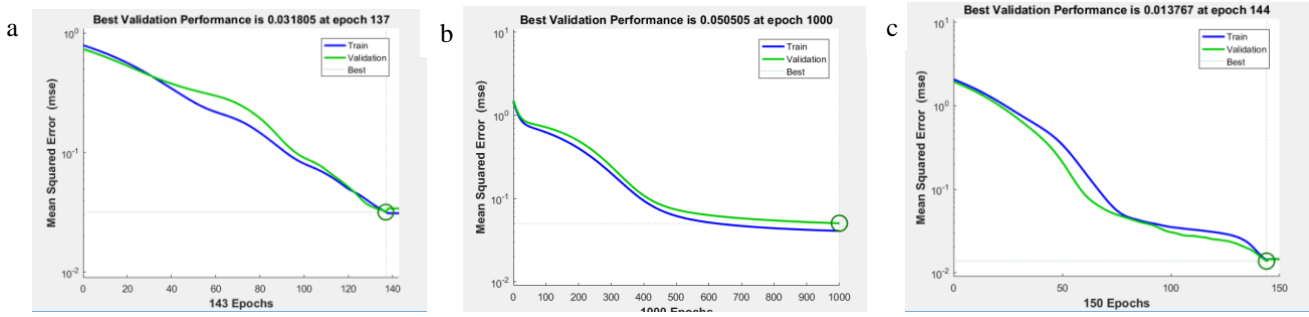


Şekil 5. YSA'nın test tahmin değerleri a)MGY, b) AGY, c) MAGY

Eğitilmiş programda test kümesine gönderilen verilerden çıkan sonuçlardaki doğruluk oranı şekil 5'te gösterildiği gibidir. MGY algoritması % 98.137, AGY algoritması % 97.529 ve % 99.097 oranlarında bulunmuştur. Kurulan üç farklı modelin test kümeleri içerisindeki sonuçlarında bakıldığında MAGY diğer algoritmalara göre biraz daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir.

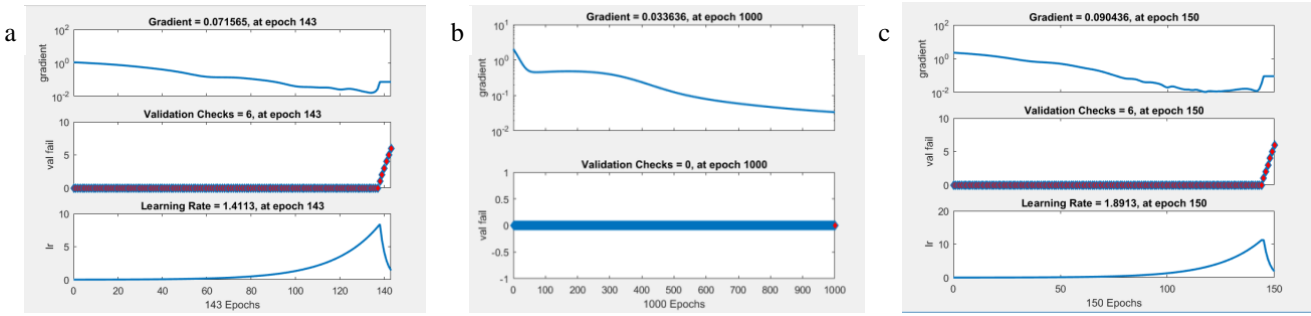
Yapay sinir ağıının çalışma mantığında durdurma kriterleri doğrulama sayısı, hata değeri ve çevrim sayısıdır. Modellerde literatürde yaygın olarak kullanılan ortalama kareli hata (Mean Square Error (MSE)) formülü tercih edilmiştir. Şekil 6'da modellerin en iyi

doğrulama performansları görülmektedir. Hata değerleri; MGY algoritması için 0.031805, AGY algoritması için 0.050505 ve MAGY için 0.013767'dir. Doğrulama performansına en kısa sürede MGY algoritması ulaşmıştır.

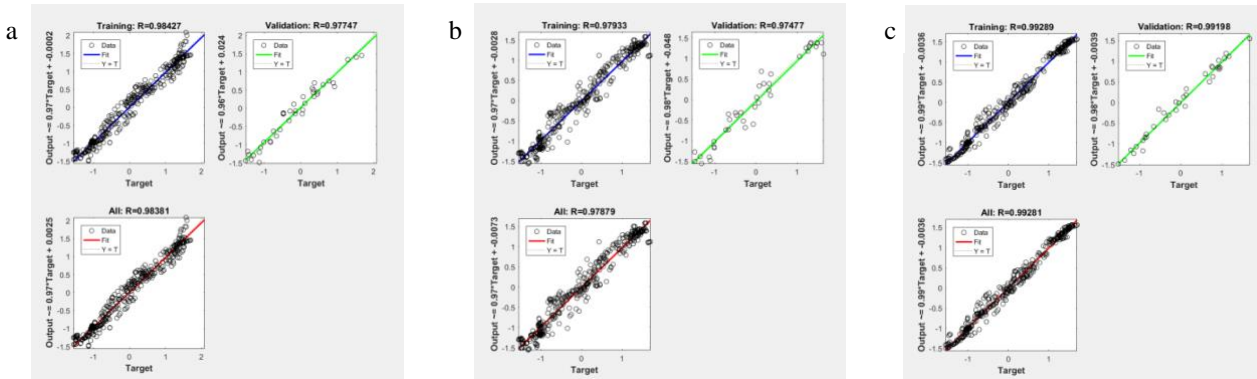


Şekil 6. Algoritmaların doğrulama performansı a)MGY, b) AGY, c) MAGY

YSA'da farklı algoritmalar türetilerek performans değerlendirmesi yapılmıştır. Bu algoritmaların kuruluş mantığına göre çeşitli ölçütler kullanılmıştır. Şekil 7'de gradyant azaltma, öğrenme katsayısı ve başarısız doğrulamanın çevrim sayısına bağlı değişimi gösterilmektedir. MGY algoritmasının gradyant (Gradient) 0.07156, öğrenme katsayısı (lr) 1.41, başarısız doğrulama (validation fail) 6'dır. AGY algoritmasında gradyant (Gradient) 0.0336 ve başarısız doğrulama (validation fail) 0'dır. MAGY algoritmasında gradyant (Gradient) 0.09, öğrenme katsayısı (lr) 1.89, başarısız doğrulama (validation fail) 6'dır.



Şekil 7. YSA'nın gradyant, öğrenme katsayısı ve başarısız doğrulamanın çevrim sayısına bağlı değişimi a)MGY, b) AGY, c) MAGY



Şekil 8. YSA'nın eğitilen model için tüm tahmin değerleri a)MGY, b) AGY, c) MAGY

Şekil 8 iki yönlü fonksiyonel kademelendirilmiş plakada üç farklı eğitim algoritmasındaki tüm tahmin değerlerini göstermektedir. MGY algoritmasının eğitim için tahmin değeri 0.98427, doğrulama için tahmin değeri 0.97747 ve toplam tahmin değeri 0.98381'dir. AGY algoritmasını eğitim için tahmin değeri 0.97933, doğrulama için tahmin değeri 0.97477 ve toplam tahmin değeri 0.97879'dir. MAGY algoritmasını eğitim için tahmin değeri 0.99289, doğrulama için tahmin değeri 0.99198 ve toplam tahmin değeri 0.99281'dir. Üç algoritmanın sonuç dataları incelendiğinde gerçek değerlerle uyumlu olduğu görülmektedir. YSA'nın sonuçlarının 1'e yakın olması istenir fakat ezberci bir yaklaşımla çözüm anlamına geldiği için 1'e çok yakınsaması istenmez. Ezberci bir mantıkla kurulan YSA'da eğitim ve test veri kümelerinin dışındaki gönderilen verilerde aynı performansı göstermeyebilir. Şekil 8'de MGY ve MAGY algoritmalarının analiz değerlerinin çok iyi olduğu görülmekte fakat MAGY algoritmasının 1'e çok yaklaştığı için ezberci çözüm yaptığı düşünülmektedir.

Tablolarda algoritmaların performansı gerçek değerler ve gerçek değerlere ne kadar yaklaştığını belirten hata değerleri göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur.

Tablo 1'de momentumlu geriye yayılım algoritmasının eş değer gerileme değerleri üzerindeki minimum ve maksimum hata değerleri gösterilmektedir. $(\sigma_{eqv})_1$ 'de minimum hata değeri 0.0051 ve maksimum hata değeri 4.036'dir. $(\sigma_{eqv})_2$ 'de minimum hata

değeri 0.0734 ve maksimum hata değeri 8.94'dir. $(\sigma_{\text{eqv}})_3$ 'de minimum hata değeri 0.0094 ve maksimum hata değeri 10.36'dir. $(\sigma_{\text{eqv}})_4$ 'de minimum hata değeri 0.0033 ve maksimum hata değeri 2.74'dir. Tablo 1: Momentumlu geriye yayılım algoritmasının eş değer gerilme değerlerine ulaşma performansına bakıldığında en iyi performansın %0.0012 hata oranı ile $(\sigma_{\text{eqv}})_1$ 'de olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Momentumlu Geriye Yayılım Algoritmasının hata değerleri

m	n	Reel değerler				Hata değerleri			
		$(\sigma_{\text{eqv}})_1$ FDM	$(\sigma_{\text{eqv}})_2$ FDM	$(\sigma_{\text{eqv}})_3$ FDM	$(\sigma_{\text{eqv}})_4$ FDM	$(\sigma_{\text{eqv}})_1$ MGY	$(\sigma_{\text{eqv}})_2$ MYG	$(\sigma_{\text{eqv}})_3$ MGY	$(\sigma_{\text{eqv}})_4$ MGY
0.06	0.29	406.197	37.777	155.874	4.174	1.454	8.303	3.484	0.677
0.09	0.98	391.783	86.872	164.698	10.236	0.507	2.757	6.405	2.685
0.65	0.81	392.906	97.370	179.250	18.205	0.771	0.525	10.370	0.967
0.81	0.24	405.750	55.104	157.212	7.740	0.214	2.864	1.839	0.003
0.14	0.48	399.621	57.600	163.747	6.874	0.005	3.047	0.009	0.814
1.02	1.48	388.709	126.925	202.280	28.866	1.326	0.007	1.490	2.748
1.37	0.00	422.252	18.317	101.728	2.031	4.036	1.590	0.085	1.331

Tablo 2'de adaptif geriye yayılım algoritmasının eş değer gerilme değerleri üzerindeki minimum ve maksimum hata değerleri gösterilmektedir. $(\sigma_{\text{eqv}})_1$ 'de minimum hata değeri 0.016 ve maksimum hata değeri 10.63' dir. $(\sigma_{\text{eqv}})_2$ 'de minimum hata değeri 0.11 ve maksimum hata değeri 21.36'dir. $(\sigma_{\text{eqv}})_3$ 'de minimum hata değeri 0.0006 ve maksimum hata değeri 29.51' dir. $(\sigma_{\text{eqv}})_4$ 'de minimum hata değeri 0.018 ve maksimum hata değeri 4.65'dir. Tablo 2: Adaptif geriye yayılım algoritmasının eş değer gerilme değerlerine ulaşma performansına bakıldığında en iyi performansın %0.00002 hata oranı ile $(\sigma_{\text{eqv}})_3$ 'de olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Adaptif Geriye Yayılım Algoritmasının hata değerleri

m	n	Reel değerler				Hata değerleri			
		$(\sigma_{\text{eqv}})_1$ FDM	$(\sigma_{\text{eqv}})_2$ FDM	$(\sigma_{\text{eqv}})_3$ FDM	$(\sigma_{\text{eqv}})_4$ FDM	$(\sigma_{\text{eqv}})_1$ AGY	$(\sigma_{\text{eqv}})_2$ AGY	$(\sigma_{\text{eqv}})_3$ AGY	$(\sigma_{\text{eqv}})_4$ AGY
0.120	0.180	411,340	28,599	144,95	3,24	0,0157	4,676	12,045	0,0187
0.090	0.980	391,782	86,872	164,69	10,23	7,384	14,188	2,11	4,65
0.940	0.160	409,346	46,18	147,98	5,808	10,63	18,35	29,50	0,4197
0.480	0.990	391,354	100,28	176,59	17,803	6,23	21,93	5,53	3,589
1.240	1.440	388,824	129,92	210,075	29,29	1,497	0,110	2,91	0,0369
1.390	1.180	389,763	127,058	213,69	27,69	3,125	3,686	0,0006	1,102

Tablo 3'te momentumlu adaptif geriye yayılım algoritmasının eş değer gerilme değerleri üzerindeki minimum ve maksimum hata değerleri gösterilmektedir. $(\sigma_{\text{eqv}})_1$ 'de minimum hata değeri 0.004 ve maksimum hata değeri 0.02'dir. $(\sigma_{\text{eqv}})_2$ 'de minimum hata değeri 4.12 ve maksimum hata değeri 15.76'dir. $(\sigma_{\text{eqv}})_3$ 'de minimum hata değeri 1.76 ve maksimum hata değeri 11.15'dir. $(\sigma_{\text{eqv}})_4$ 'de minimum hata değeri 1.56 ve maksimum hata değeri 26.56'dir. Tablo 3: Momentumlu adaptif geriye yayılım algoritmasının eş değer gerilme değerlerine ulaşma performansına bakıldığında en iyi performansın %0.0001 hata oranı ile $(\sigma_{\text{eqv}})_1$ 'de olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Momentumlu Adaptif Geriye Yayılım Algoritmasının hata değerleri

m	n	Reel değerler				Hata değerleri			
		$(\sigma_{\text{eqv}})_1$ FDM	$(\sigma_{\text{eqv}})_2$ FDM	$(\sigma_{\text{eqv}})_3$ FDM	$(\sigma_{\text{eqv}})_4$ FDM	$(\sigma_{\text{eqv}})_1$ AGY	$(\sigma_{\text{eqv}})_2$ AGY	$(\sigma_{\text{eqv}})_3$ AGY	$(\sigma_{\text{eqv}})_4$ AGY
0.5100	0.1300	412.8515	31.7046	139.4998	3.6903	3.3912	2.9426	14.8077	0.2583
0.4700	0.1700	410.5305	36.3780	145.7335	4.4840	2.6650	0.9788	13.8440	0.0117
0.8300	0.1200	412.2739	36.8680	139.1693	4.3723	4.1165	6.4879	13.7991	0.2481
0.0080	0.4700	400.2525	51.5842	162.6774	5.1616	1.4672	14.9157	2.1238	4.2442
0.0090	0.4200	401.6952	47.5085	161.3884	4.7988	1.4903	15.7603	0.1127	4.0595
1.0900	1.3300	389.2060	125.2261	202.6348	28.2247	0.0614	1.7945	5.4586	0.3042
1.2400	1.4400	388.8244	129.9237	210.0759	29.2899	0.0040	0.0307	0.0529	0.3983
1.2800	1.4000	388.9474	129.9201	210.2872	29.1184	0.1152	0.0177	0.2782	0.2313

Tablolarda genel bir değerlendirme yapıldığında MYG ve MAGY algoritmasının $(\sigma_{eqv})_1$ değerleri için daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.

4. Sonuç

Yapay sinir ağına tek katmanlı algılayıcı model kurulmuş olup üç farklı eğitim algoritması uygulanarak durumlar incelenmiştir. Kompozisyonel gradyant üst değerlerindeki eş değer gerilme değerlerine bakılarak algoritmalar karşılaştırılmıştır. Dikdörtgen plakanın eş değer gerilme değerlerinin en büyüğünün büyüğüne $(\sigma_{eqv})_1$ bakıldığında ortalama kareli hata hesabına göre minimum hatanın MAGY algoritmasında, maksimum hatanın AGY algoritmasında ve en iyi performansın MAGY algoritmasında olduğu görülmektedir. Eş değer gerilme değerlerinin en büyüğünün en küçüğüne $(\sigma_{eqv})_2$ bakıldığında minimum hatanın MAGY algoritmasında, maksimum hatanın AGY algoritmasında ve en iyi performansın MGY algoritmasının olduğu görülmektedir. En küçüğünün en büyüğünde ise $(\sigma_{eqv})_3$ minimum hata MGY algoritmasında, maksimum hata AGY algoritmasında ve en iyi performans MGY algoritmasında sonuçlanmıştır. En küçüğünün en küçüğü $(\sigma_{eqv})_4$ için ise minimum hata MGY algoritmasında, maksimum hata AGY algoritmasında ve en iyi performans MGY algoritmasında gerçekleşmiştir. Tablo 4'te üç algoritmanın eşdeğer gerilme değerlerindeki minimum, maksimum, ortalama kareli hata değerleri gösterilmiştir. Ayrıca yine Tablo 4'te görüldüğü üzere genel anlamda bakıldığında fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda MGY algoritması diğer algoritmalara göre gerçek değere yakınsamıştır. Hata oranları dikkate alındığında MGY algoritması ile oluşturulan YSA'nın güvenle kullanılabilir olduğunu görülmektedir. Daha sonra yapılacak çalışmalarda YSA ile model oluşturma aşamalarında eğitim algoritması olarak MGY yöntemi tercihen önde olacaktır. Termal gerilme analizinde sonlu farklar metodu ile n ve m kompozisyonel gradyant üst değerlerindeki eş değer gerilme değerlerine ulaşılması yaklaşık 1800 saniye sürmektedir. Her bir değer için bu süre dikkate alındığında optimum hacimsel dağılımdaki kompozisyonel gradyant üst değerini bulmak uzun zaman almaktadır. YSA'da ise veri setini oluşturduktan sonra değerlere yaklaşık 5.30 saniyede ulaşılmaktadır. Kurulan YSA modeli ile sonlu farklar yöntemine göre 340 kat daha hızlı çözüm elde edilmiştir. Kurulan model, belirlediğimiz sınır koşulları altında henüz seri üretimi gerçekleştirilemeyen fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin hem üretiminde hem yapılacak teorik çalışmalarda optimum hacimsel dağılıma ulaşmak için fikir verici/yol gösterici olacaktır. Literatürde fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler için data setlerinin oluşturulmasında Petrov-Galerkin (MLPG), State-Space Based Differential Method (SSDQM) ve Finite Element Method (FEM) gibi birçok farklı sayısal yöntem kullanılarak optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Fakat fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler için termal gerilme analizinin sonlu farklar metodu ile çözülüp (Finite Difference Method (FDM)) YSA ile değerlendirilmesi yeni bir durumdur.

Tablo 4. MSE, minimum ve maksimum hata değerleri

	EQV	MİN	MAK	MSE
$(\sigma_{eqv})_1$	MGY	0.0051	4.035	1.76
	AGY	0.0157	10.63	14.04
	MAGY	0.004	4.116	1.56
$(\sigma_{eqv})_2$	MGY	0.0073	8.941	11.15
	AGY	0.11	21.94	59.68
	MAGY	0.018	15.76	26.56
$(\sigma_{eqv})_3$	MGY	0.0093	10.37	25.62
	AGY	0.0006	29.51	70.76
	MAGY	0.053	14.8	38.56
$(\sigma_{eqv})_4$	MGY	0.0034	2.748	0.58
	AGY	0.0187	4.65	4.14
	MAGY	0.012	4.244	2.24

Referanslar

Cho J.R., Ha D.Y. (2002). Optimal tailoring of 2D volume-fraction distributions for heat-resisting functionally graded materials using FDM. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 191 (29-30). 3195-3211.doi: 10.1557/S0883769400048867

Çakır D., (2018). Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda malzeme kompozisyonunun yapay sinir ağı ve genetik programlama ile belirlenmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, 2018.

- Demirbaş M.D, Çakır D., (2018). Thermal stress control in functionally graded plates with artificial neural network. ISVOS Journal. 2(1). 39-55. Retrieved from <http://dergipark.gov.tr/download/article-file/515245>
- Demirbaş M.D. (2012). Düzlem içi ısı yüküne maruz iki yönlü işlevsel kademelendirilmiş dikdörtgen ve dairesel plakanın ısı iletme analizi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği. Aralık 2012.
- Do T.T. D., Lee D., Lee J.(2019). Material optimization of functionally graded plates using deep neural network and modified symbiotic organisms search for eigenvalue problems. Composites: Part B. 159. 300-326.doi: 10.1016/j.compositesb.2018.09.087
- Haykin. S.,2005, Neural networks. Prentice Hall. New Jersey.
- Jodaeei, A. Jalal, M., Yas, M.H. (2012). Free vibration analysis of functionally graded annular plates by state-space based differential quadrature method and comparative modeling by ANN. Composites: Part B. 43(2). 340-353.doi: 10.1007/s12206-012-0860-2
- Khoshnoodi H.,Yas M.H.,Samadinejad A.,(2016) Dynamic Analysis of Multi-Directional Functionally Graded Panels and Comparative Modeling by ANN. Journal of Solid Mechabics, 8(3).482-494. Retrieved from http://jsm.iauarak.ac.ir/article_524265.html
- Koizumi M., Niino M. (1995).Overview of FGM research in Japan, MRS Bulletin. 20(1).19-21.doi: 10.1557/S0883769400048867
- MATLAB.Mathematical software, version 2009a, TheMathWorks. Retrieved from <http://www.mathworks.com>.
- Moitaa J.S., Araújo A.L., Correia F.V., Soares C.M.M, Herskovitsc J. (2018). Material distribution and sizing optimization of functionally graded plateshell structures, Composites Part B: Engineering.142. 263-272.doi: 10.1016/j.compositesb.2018.01.023
- Nazari F., Abolbashari M.H. , Hosseini S.M. (2015) Three Dimensional Natural Frequency Analysis of Sandwich Plates with Functionally Graded Core Using Hybrid Meshless Local Petrov-Galerkin Method and Artificial Neural Network. CMES.105(4). 271-299. doi:10.3970/cmcs.2015.105.271
- Nemat-Alla M. (2003). Reduction of thermal stresses by developing two-dimensional functionally graded materials, International Journal of Solids and Structures, 40(26). 7339-7356.doi: 10.1016/j.ijsolstr.2003.08.017
- Ootao Y., Tanigawa Y., Nakamura T., (1999). Optimization of material composition of FGM hollow circular cylinder under thermal loading a neural network approach. Composites Part B: Engineering. 30(4). 415-422.doi: 10.1016/S1359-8368(99)00003-7
- Öztürk C. (2011). Yapay Sinir Ağlarının Yapay Arı Kolonisi Algoritması İle eğitilmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği. Ocak 2011.
- Parlos A.G., Muthusami J., Atiya A.F. (2017). Incipient fault detection and identification in progress systems using accelerated neural network learning. Nuclear Technology. 105(2). 145-161.doi: 10.13182/NT94-A34919
- Salavati H., Alizadeh Y., Kazemi A., Berto F., (2015) A new expression to evaluate the critical fracture load for bainitic functionally graded steels under mixed mode (I + II) loading. Engineering Failure Analysis 48. 121–136.doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.11.005
- Shabana Y.M., Noda N. (2001). Thermo-elastic-plastic stresses in functionally graded materials subjected to thermal loading taking residual stresses of the fabrication process into consideration, Composites Part B: Engineering, 32(2). 111-121.doi:10.1016/S1359-8368(00)00049-4
- Singh A.K., Siddhartha, Hussain S., (2015) Wear peculiarity of TiO2 filled polyester-based Homogeneous composites and their Functionally Graded Materials using Taguchi methodology and ANN. Materials Today: Proceedings. 2. 2718 – 2727.doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.239
- Xu.Y., You.T. (2013). Minimizing thermal residual stresses in ceramic matrix composites by using Iterative MapReduce guided particle swarm optimization algorithm. Composite Structures. 99. 388-396.doi: 10.1016/j.compstruct.2012.11.027.



AZ91 Mg Alaşımına Farklı Oranlarda Sb İlavesi İle Katılaşma Hızının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi

Effects of Solidification Rate on Microstructure and Mechanical Properties with Sb at Different Ratio of AZ91 Quality Mg Alloy

Levent Elen¹, Yunus Türen², Erkan Koç²

¹ Karabük Üniversitesi, TOBB Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 78050 Karabük, TÜRKİYE

² Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü 78050 Karabük, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 03/01/2019

Kabul/Accepted: 05/03/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Mevcut kullanım alanları gün geçtikçe artış gösteren Mg alaşımlarının, teknolojik gelişmelere uyum sağlayabilmesi için mekanik özellikler bakımından daha fazla geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Günümüzde çözünebilir biyo-malzeme olarak sağlık alanında da kullanılmaya başlayan Mg ve alaşımlarına kazandırılan fiziksel ve mekanik özellikler malzemenin kullanım ömrünü tayin etmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada, AZ91 serisi Mg alaşımına farklı oranlarda (%0.2 - %0.5 ve %1.0) Sb elementi ilavesi ve katılaşma hızının da etkisiyle mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmanın neticesinde sonuçlar incelendiğinde; AZ91 alaşımının genel olarak tane yapısının α -Mg ve tane sınırları boyunca yayılan β -Mg₁₇Al₁₂ fazından oluştuğu saptanmıştır. Hızlı soğumanın tane yapısında küçülmelere sebep olduğu bununla birlikte tane sınırlarında bulunan Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazının inceliğe parçalandığı tespit edilmiştir. Tespit edilen bu etkilerin neticesinde de alaşımın çekme, akma ve uzama değerlerinde artışın olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte AZ91 alaşımına ilave edilen Sb ile yapıda Mg₃Sb₂ fazı oluşmuştur. Bu intermetalik fazın yapıda meydana getirdiği değişiklikler ile alaşımın mekanik özelliklerinde artış izlenmiştir. AZ91 alaşımının çekme dayanımı Sb ilavesi ile 163 MPa seviyelerinden 217 MPa seviyelerine kadar iyileşmiştir. Sb ilavesiyle AZ91 alaşımında sertlik değerleri yaklaşık 57 HV değerlerinden 81 HV değerlerine yükselmiştir.

Anahtar Kelimeler

“AZ91, Mg alaşımları, soğuma hızı, mekanik özellikler, mikroyapı”

Abstract

The increasing use of Mg alloys in today's applications has necessitated further improvement in mechanical properties in order to adapt to technological developments. The physical and mechanical properties of Mg and its alloys, which are now being used in the field of health as soluble biomaterials, determine the useful life of the material. Therefore, in this study, it was aimed to improve the mechanical properties of AZ91 series Mg alloy at different ratios (0.2% - 0.5% and 1.0%) by the addition of Sb element and the effect of solidification rate. When the results of the study are examined, it has been found that the AZ91 alloy generally consists of α -Mg grain structure and β -Mg₁₇Al₁₂ phase extending along grain boundaries. It has been found that the intermetallic phase of Mg₁₇Al₁₂ in the grain boundaries has been thinned and disintegrated because of rapid cooling causing the grain structure to shrink. As a result of these detected effects, it was observed that the tensile strength of the alloy, the yield strength and the unit (percent) elongation ratios were increased. However, Mg₃Sb₂ phase was formed with Sb added to AZ91 alloy. The mechanical properties of the alloy increased with the changes in the structure of this intermetallic phase. The tensile strength of the AZ91 alloy improved with the addition of Sb from 163 MPa to 217 MPa and with the increasing amount of Sb, the hardness values of the AZ91 alloy increased from about 57 HV to 81 HV.

Key Words

“AZ91, Mg alloys, cooling rate, mechanical properties, microstructure”

1. Giriş

Buharlaştırma özelliği ve yoğunluk bakımından plastikleri andıran Mg, bir metalin sahip olduğu bütün mekanik özelliklere sahiptir. Bununla birlikte mühendislik plastikleri olarak adlandırılan malzeme grubundaki tüm malzemelerden daha rijittir ve aynı zamanda da geri dönüşümü mümkün olan bir malzemedir (Bamberger, 2013; Barber, 2004; Kazdal, 1999; Mordike & Ebert, 2001). Ayrıca Mg ve alaşımları demir dışı metal alaşımları içerisinde, en düşük yoğunluğa sahip olmasının yanı sıra iyi süneklik ve dayanım özelliği ile birlikte iyi bir korozyon direnci özelliğine sahiptir (Polmear, 1989; Westengen & Rashed, 2016). Bununla birlikte farklı döküm yöntemleri kullanılarak ya da alaşımlandırma çeşitliliği artırılarak şekillendirilebilirliği gelişime açık bir metaldir (Çiçek et al., 2013). Dolayısıyla Mg alaşımları günümüzde, sahip olduğu üstün mekanik özelliklerden dolayı endüstride hem konstrüksiyon malzemesi olarak hem de otomotiv endüstrisinde kullanım olarak önceliğe sahiptir (Gaines et al., 1996; Kazdal, 1999; Pekgülyüz & Kaya, 2003). Özellikle düşük yoğunluğa sahip olmasından dolayı dikkatini çektiği ve gözde haline geldiği diğer sektörler ise elektronik, uzay ve uçak sanayiidir. Bununla birlikte yüksek bir derecede çözünürlüğe sahip olmasına rağmen toksik özelliği (hızlı çözünme veya zehirlenme) yoktur. Bu sebeple de sağlık alanında biyomalzeme olarak da kullanıma elverişlidir (Agarwal et al., 2016; Song & Song, 2007; Staiger et al., 2006; Witte et al., 2007; Wolff et al., 2014). İlaveten hegzagonal sıkı paket (HSP) yapılı magnezyumun sahip olduğu tane yapısı, katı eriyik ve çökelti sertleşmesi gibi önemli iki sertleştirme mekanizmasına olanak tanır (Wolff et al., 2014). Ancak magnezyum metali (II A) sütununda bulunan ve dolayısıyla da oksijen ile çok çabuk reaksiyona girme özelliğine sahip toprak alkaliler üyesi olduğu için hem ergitme esnasında ocak içerisinde hem de döküm esnasında kalıp içerisinde sıvı metalin bu reaksiyonunu engelleyici inert gazlar kullanılmalıdır (Çiçek et al., 2013; Çiçek & Sun, 2012; Unal, 2008). Bu özelliklerinin yanı sıra dökülebilirliği oldukça iyi olması ve yer kabuğunda oldukça fazla miktarda varlık göstermesi magnezyumu, alüminyum ve çelikten sonra en çok kullanılan alaşım elementi durumuna getirmiştir (Ali et al., 2015; Y. Lee et al., 2000; Suh et al., 2015).

2. Literatür Özeti

Magnezyum alaşımları içerisinde AZ91 çok iyi derecede döküm ve mekanik özelliklere sahip olduğu için en çok kullanılan alaşımdır (Çiçek et al., 2006). Bununla birlikte en iyi sürünme direncinin oda sıcaklığında olması da (Zhang, 2000) AZ91 alaşımının en fazla kullanılan Mg alaşımı olmasına katkı sağlamıştır. Alaşım yapmaya yatkın olmasından dolayı mekanik ve mikroyapı özellikleri geliştirilmeye çok müsaittir. Dolayısıyla birçok element ile yapılan deneysel çalışmalarda literatüre çok önemli bilgiler katılmıştır. Özellikle Sb ile ilgili yapılan çalışmalar çok çarpıcı sonuçlar ortaya koymuştur.

Yüzey aktif bir element olan Sb'un Mg alaşımlarına ilave edilmesi durumunda alaşımın tane yapısını inceltir (Polmear, 1996) ve tane sınırlarında bileşik oluşumunu destekler (Carbonneau et al., 1998). Bu sayede de alaşımın oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta mukavemetini artırır (Park et al., 1994) ve sürünme özelliği ile birlikte akışkanlığının artmasına da yardımcı olur (S. Lee et al., 1998). Pekgülyüz (MÖ, 1992), Mg-Sb ikili alaşımının düşük uzaması nedeniyle Sb'nin Mg alaşımlarının mikro yapısı ve mekanik özellikleri, özellikle Zn ve Al içeren Mg alaşımlarına etkileri üzerine daha fazla araştırma yapılması gerektiğini önermiştir. Wang, Q. ve ark. (Wang et al., 2001) AZ91'e Sb ilavesi ile yapmış oldukları çalışmada belirli oranlarda katılan Sb'un AZ91 alaşımının mekanik özellikler üzerine olumlu etkilerinin olduğundan bahsetmiştir. Bir başka çalışmada ise Guangyin, Y. ve ark. (Guangyin et al., 2001) yüksek sıcaklıklarda sürünme direncinin yanı sıra β fazının stabilitesini koruduğu tespiti gibi önemli bir tespit rapor etmiştir. Fakat yapılan çalışmaların hiçbirinde soğuma hızı dikkate alınmamıştır. Bunun sonucunda bu çalışmada farklı oranlarda Sb ilavesinin yanı sıra farklı soğuma hızlarının AZ91 alaşımında mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi incelenmiştir.

3. Malzeme ve Metot

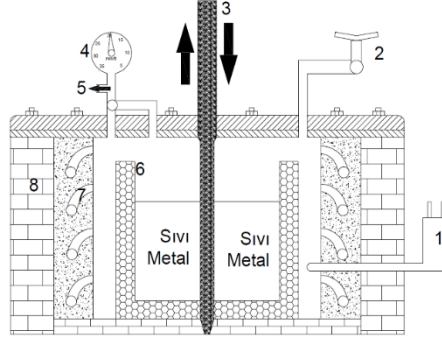
3.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda, AZ91 master alaşımının ve diğer alaşımların hazırlanmasında 99.9 % saflıkta elementler kullanılmıştır. Master alaşım Sb elementi ön alaşımlama prosesi ile ilave edilmiştir. Bu proseste ikinci bir ergitme işlemi ile hazırlanan ön alaşımlar tekrar ergitilip %0.2, %0.5 ve %1.0 Sb alaşım elementi ilavesi ile tekrar dökülmüştür. Sonuç olarak AZ91, AZ91+%0.2 Sb, AZ91+%0.5 Sb ve AZ91+%1.0 Sb alaşımları hazırlanmıştır.

3.2. Metot

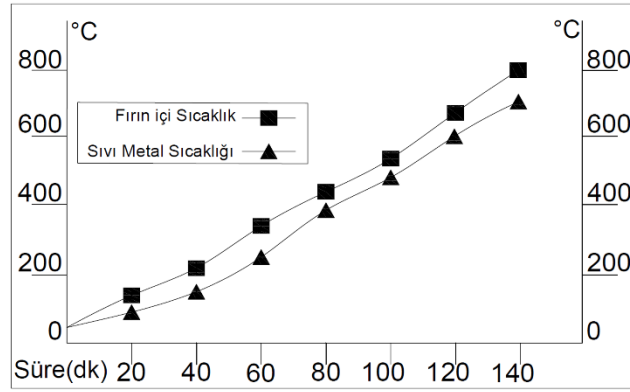
3.2.1. Ergitme, döküm ve kalıp

Ergitme işlemlerinin yapıldığı fırının (Şekil 1) iç yüzeyi refrakter tuğla ile kaplanmış ve ergitme işleminde kapasitesi yaklaşık olarak 2 Kg olan mobil çelik döküm pota kullanılmıştır. Ergitme esnasında da ocak atmosferinin kontrolü için koruyucu gaz olarak Argon kullanılmıştır. Ocak içerisinde ve metalde sıcaklık değeri 750 °C olacak şekilde takip edilmiştir.



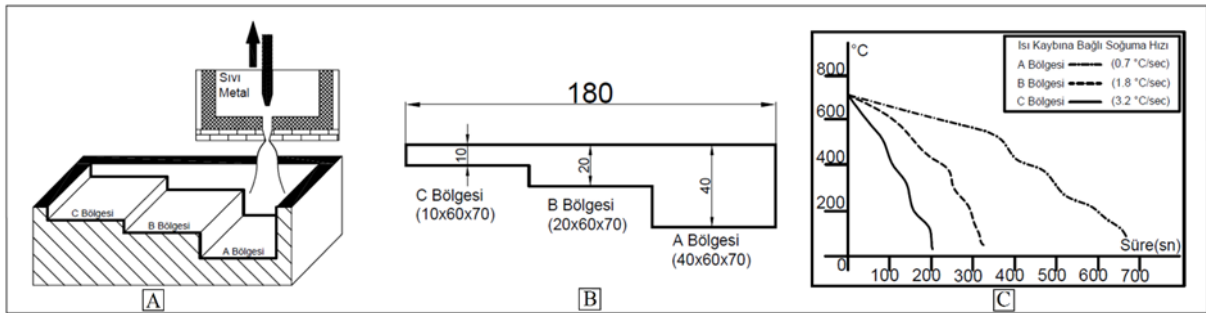
Şekil 1. Ergitme fırınının şematik gösterimi (1- Termokupl, 2- Ar girişi, 3- Seramik tıkaç, 4- Ar göstergesi, 5- Ar çıkışı, 6- Ergitme potası, 7- Rezistans, 8- Refrakter malzeme).

Ergime sıcaklığına ulaşıldıktan sonra 10-15 dakika bekletilerek alaşımın döküm sıcaklığına ulaşması sağlanmıştır. Ocağın ve sıvı metalin sıcaklık dengesi Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Fırın-Eriyik sıcaklık diyagramı (Sıcaklık kalibrasyonu).

Dökümler yerçekimi kuvvetinden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Döküm sıcaklığına varan eriyik; pota ortasında bulunan döküm yolunun açılması ve yerçekimi etkisi ile Şekil 3(A)’da kesiti görülen kalıba aktarılmıştır. Kalıp malzemesi olarak AISI 1040 kalite çelik malzeme kullanılmış ve kalıp iç yüzeyi Ra 2.5 hassasiyetinde işlenmiştir. Döküm öncesi kalıp ani soğuma hatalarını en aza indirmek adına 250 °C sıcaklığa kadar klasik bir fırında ön ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Dökümü yapılan üç kademeli deney numunesi Şekil 3(B)’de gösterilmiştir. Döküm sonrası Şekil 3(B)’de verilen kademeli kalıbın her bir kademesinin soğuma hızı bütünlük bir program (ADAM-4018 thermocupl input modul) yardımı ile ölçülmüştür. Programdan elde edilen sıcaklık-zaman eğrileri ve soğuma hızları Şekil 3(C)’de verilmiştir.



Şekil 3. Kalıp, Döküm parça ölçüleri ve Soğuma hızı grafiği (A) Kalıp kesit resmi, (B) Döküm parça, (C) Soğuma hızı grafiği.

AZ91 alaşımlarının ve deneysel çalışmalarda ilave edilen alaşım elementlerinin % miktarları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. AZ91 ve alaşımlarının % element miktarları

Alaşımlar	% Element					
	Al	Zn	Mn	Sb	Diğer	Mg
AZ91	9,11	0,76	0,16	-	0,021	Kalan
AZ91 + 0.2Sb	9,21	0,76	0,18	0,19	0,017	Kalan
AZ91 + 0.5 Sb	9,15	0,69	0,19	0,57	0,0012	Kalan
AZ91 + 1.0 Sb	9,11	0,76	0,16	1,02	0,021	Kalan

3.2.2. Mikroyapı analizi

Mikroyapı incelemeleri için numune yüzeyleri klasik metalografik yöntemler kullanılarak hazırlanmıştır. İncelenecek yüzeyler 1 µm alümina (Al₂O₃) kullanılarak parlatılmış ve alkolle yüzeyleri durulanıp kurutulmuştur. Metalografik işlemlerin ardından optik mikroskopta inceleme için yüzeyler son olarak %75 etilen glikol, %24 saf su, %1.0 HNO₃ karışımı ile dağlanmıştır. Daha sonra SEM çalışmaları için 70 ml etanol, 10 ml su, 20 ml asidik asit ve 4.2 g pikrik asit ile dağlanmıştır. İncelenen alaşımların mikro yapıları, bir Leica DM ILM metalürjik optik mikroskop (OM), bir Leica DFC290 kamera sistemi ve donanımlı bir Jeol6060 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Yapıda bulunan bölgesel veya noktasal elementler miktarlarını incelemek adına EDS analizi yapılmış ve bu aşamada SEM fotoğrafları kullanılmıştır.

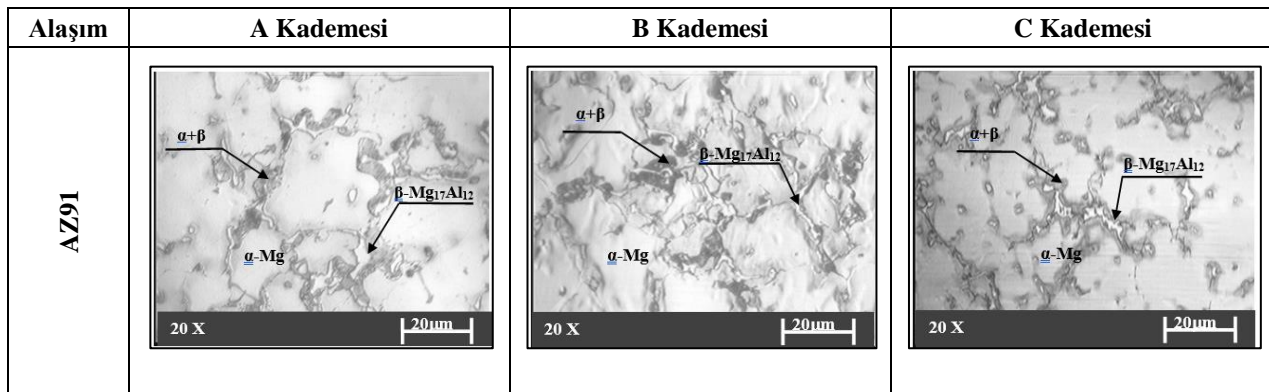
3.2.3. Mekanik test

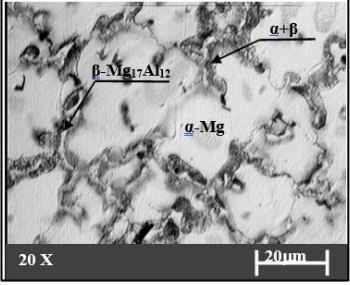
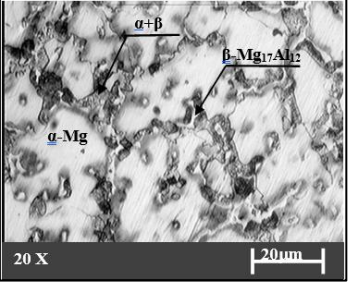
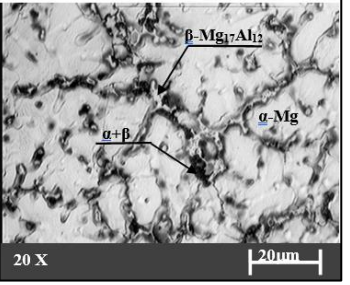
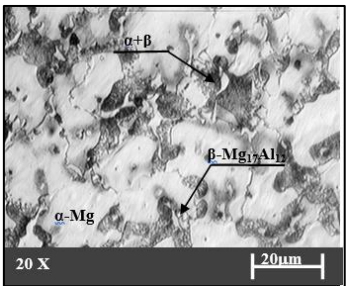
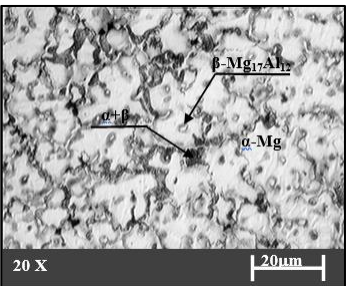
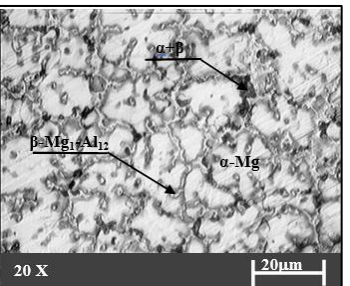
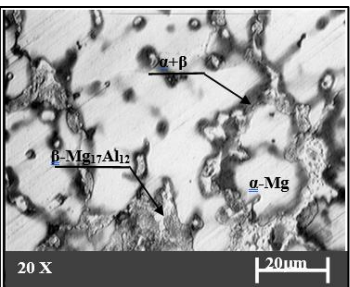
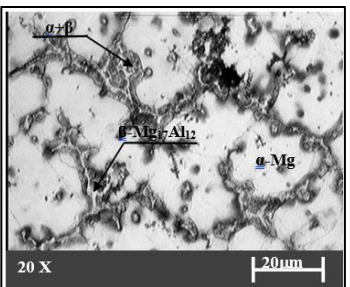
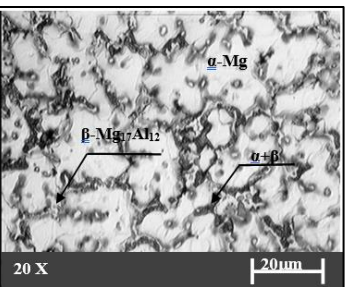
Şekil 3(B)'de verilen döküm parçasının her bir bölgesinden (A-B-C) 3 adet çekme testi numunesi ilgili standart şartlarında (ASTM B557) hazırlanmıştır. Çekme testleri Instron marka çekme cihazında 3mm/dk hızında uygulanmıştır. Çekme testi sonucunda akma-çekme dayanımları ile yüzde uzama değerleri tespit edilmiştir. İnceleme bölgelerinden ayrı ayrı çıkarılan küp (10 mm) şeklindeki numuneler üzerinden sertlik değerleri ölçülmüştür. Sertlik değerleri ölçümünde Vickers (HV) cinsinden ölçüm yapılmış ve 200 gr basma yükü kullanılmıştır. Küp numunenin her yüzeyinden birbirine yakınlığı min. 2.5 mm olan 3'er ölçüm yapıldıktan sonra ortalama değer grafiklerde gösterilmiştir.

4. Sonuç ve Değerlendirme

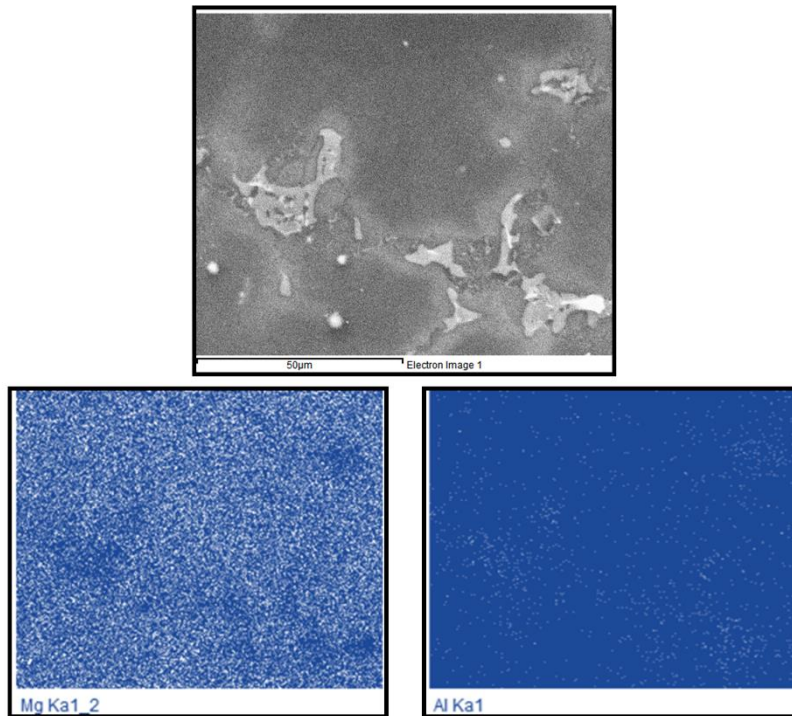
4.1. Mikroyapı Analizi

Master alaşım olarak üretilen AZ91 ve Sb ilavesiyle dökümü yapılan alaşımlara ait OM görüntüleri Şekil 4'te verilmiştir. Mg-Al ikili alaşımlarında tane sınırlarında Al metalinin yığılması ve Mg-Al arasında oluşabilecek fazlar literatürde de tespit edilen bir sonuçtur (Çiçek et al., 2013; Çiçek & Sun, 2012; Ding & Ju, 2018; Falcon et al., 2011; Gray & Luan, 2002). SEM görüntülerinde verilen (Şekil 5) EDS sonuçlarına göre Mg taneleri arasında tane sınırında bulunan fazların Mg-Al intermetalik fazı olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4-8 incelendiğinde AZ91 ve alaşımlarının genel olarak mikro yapısı α-Mg ve tane sınırları boyunca yayılan β-intermetalik fazından meydana geldiği tespit edilmiştir (Jiang et al., 2010). Benzer çalışmalara bakıldığında Mg-Al ikili faz diyagramlarında görülen β-Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazı α-Mg tanelerinin sınırlarında bulunmaktadır (Çiçek et al., 2013; Çiçek & Sun, 2012; Ding & Ju, 2018; Falcon et al., 2011; Gray & Luan, 2002). Tane sınırlarında bulunan intermetalik yapı içerisinde farklı faz bileşimleri olan Mg₁₇Al₁₂, Al₃Mg₂ ve Mg₂₄Al₁₇ gibi fazlar aynı tane sınırı içerisinde oluşabilmektedir (Ding & Ju, 2018).

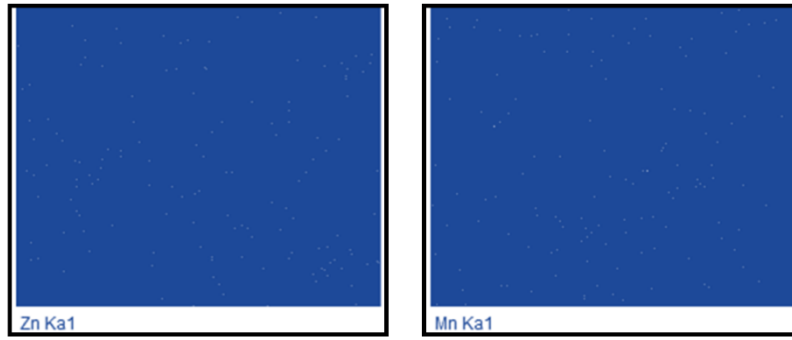
**Şekil 4.** AZ91 ve alaşımlarının mikroyapı görüntüleri.

Alaşım	A Kademesi	B Kademesi	C Kademesi
AZ91+0.2 Sb			
AZ91+0.5 Sb			
AZ91+1.0 Sb			

Şekil 4 (devam). AZ91 ve alaşımlarının mikroyapı görüntüleri.

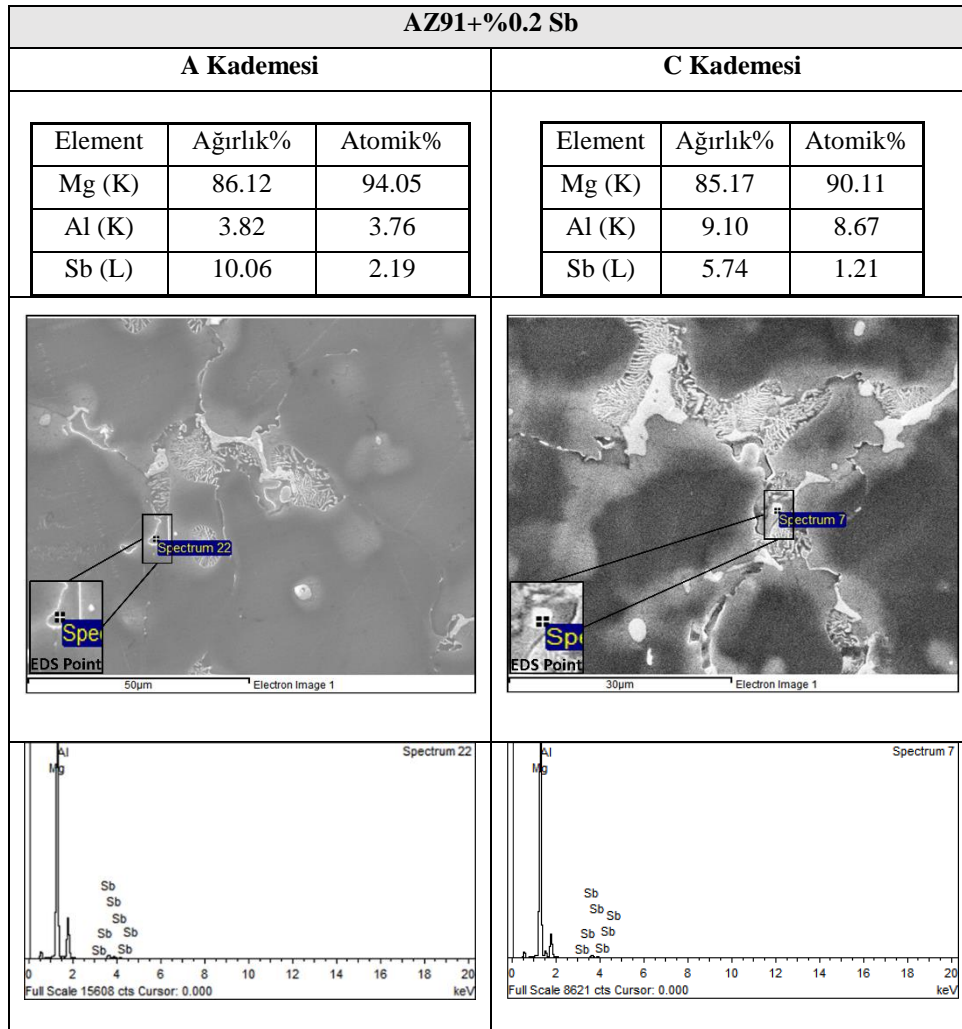


Şekil 5. AZ91 EDS-MAP görüntüsü.



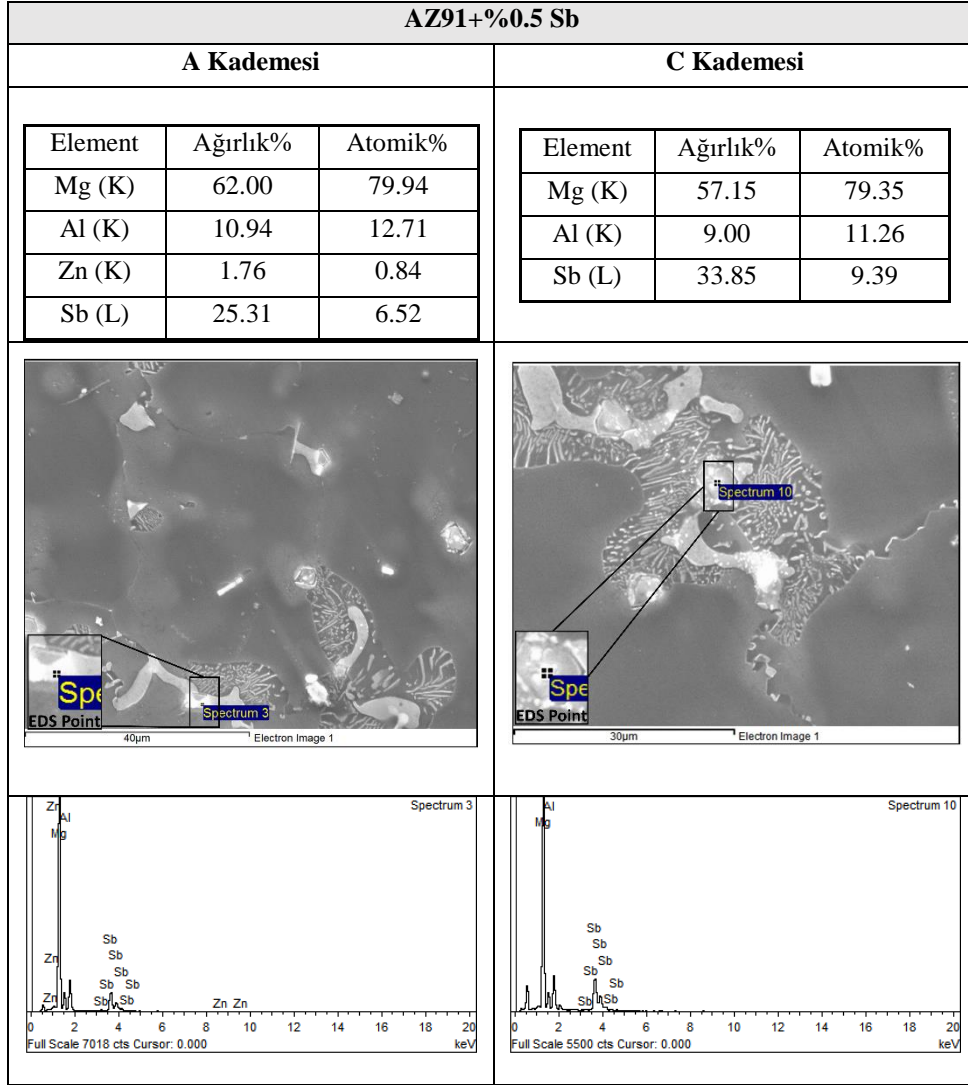
Şekil 5 (devam). AZ91 EDS-MAP görüntüsü.

Mg-Al-Zn üçlü bileşimi ile oluşturulan AZ91 alaşımı için element dağılım analizleri (EDS) sonucunda Mg metalinin yapıda homojen dağılım gösterdiği, Al metalinin tane sınırlarında ikincil bir faz (β) içerisinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir.



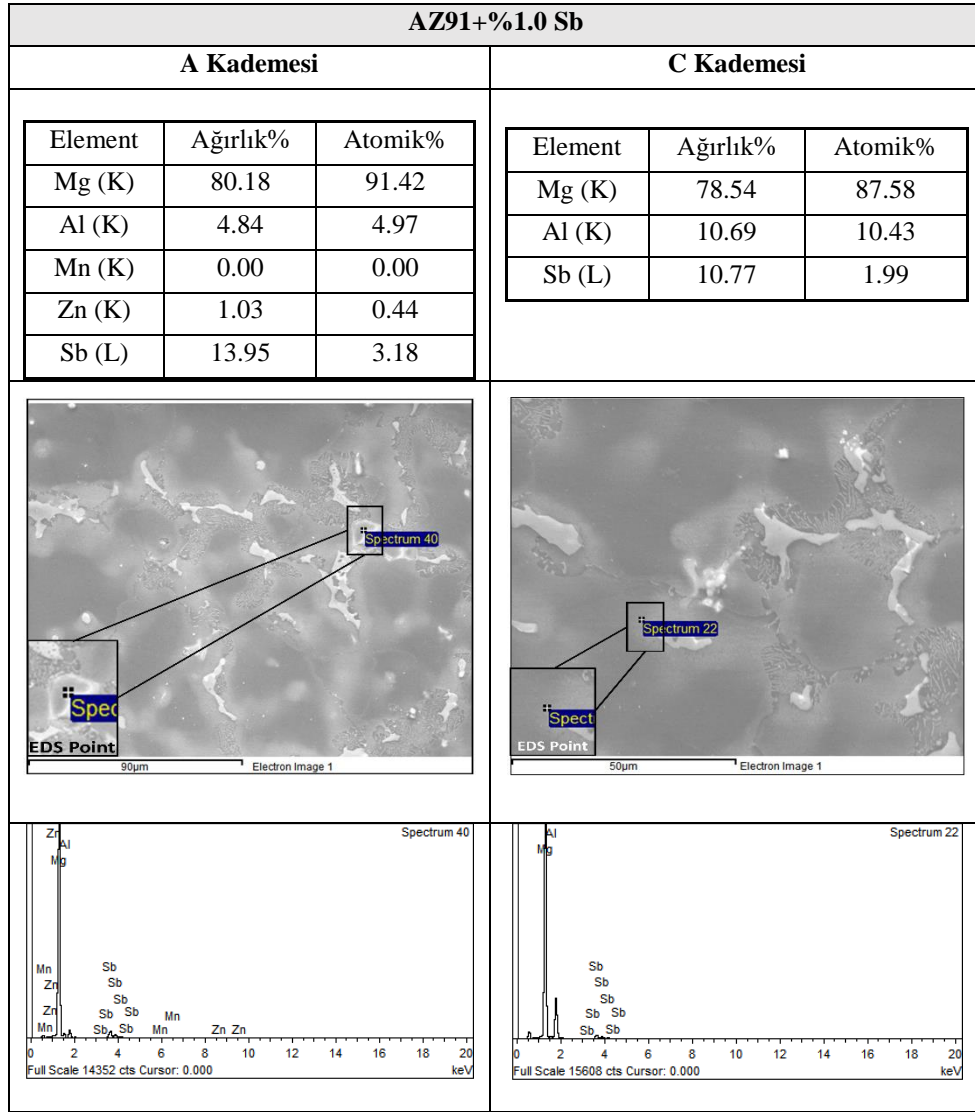
Şekil 6. AZ91+%0.2 Sb alaşımının EDS analiz sonuçları.

AZ91 alaşımına %0.2 Sb ilavesi ile Şekil 6. α matris fazının ve β intermetalik fazının hem yakın çevrelerinde hem de içlerinde küçük miktarlarda Mg_3Sb_2 intermetalik fazının oluştuğu gözlenmiştir (Boby et al., 2015). Ayrıca, Guanyin ve ark. (Guanyin et al., 2000) TEM'de XEDS ve SAD modeli kullanılarak 0.15, 0.35 ve 0.7 Sb (ağr. %) ile AZ91 alaşımında Mg_3Sb_2 fazı oluşumunu rapor etmişlerdir. Çalışmamızda da Mg_3Sb_2 fazı hızlı soğumanın (C kademesi) etkisiyle çok daha ince bir yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 7. AZ91+%0.5 Sb alaşımının EDS analiz sonuçları.

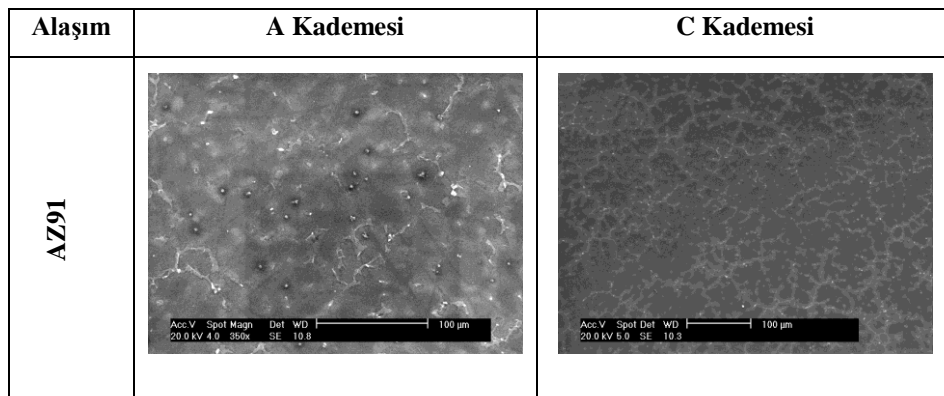
AZ91'e ilave edilen Sb element miktarı %0.5 oranına çıkartıldığında ise Şekil 7'de Mg_3Sb_2 intermetalığının belirginleştiği fakat ince bir hal aldığı gözlenmiştir. Ayrıca β intermetalik fazının oldukça ince bir hal almasıyla birlikte β fazının tane ve ötektik fazın sayısını arttırdığı gözlenmiştir (Wang et al., 2001).



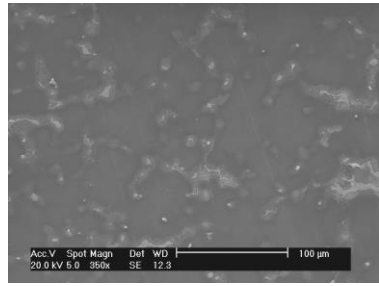
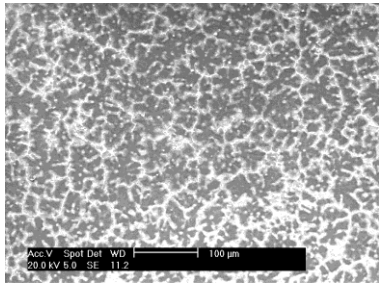
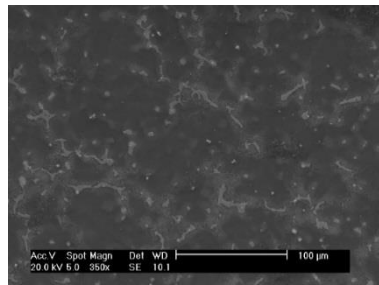
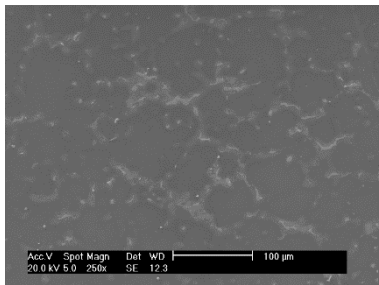
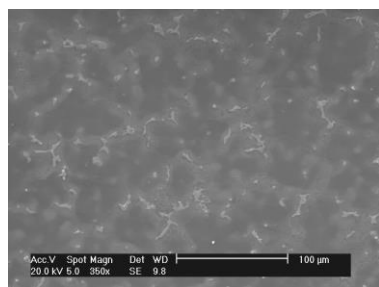
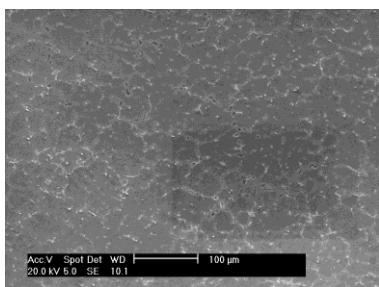
Şekil 8. AZ91+%1.0 Sb alaşımlarının EDS analiz sonuçları.

Sb ilavesi %1.0 oranına ulaştığında ise Şekil 8’de Sb ilavesinin 0.2 ve 0.5 oranındaki ilaveler sonucu yapıda görünen değişiklikler daha belirgin hale geldiği gözlenmiştir (Wang et al., 2001). Dolayısıyla β intermetalik fazının ve ötektik fazının etrafında meydana gelen Mg_3Sb_2 fazı daha ince bir hal aldığı tespit edilmiştir (Wang et al., 2001).

Soğuma hızının etkisiyle AZ91 ve alaşımlarının A kademesinden C kademesine doğru tane yapısının küçüldüğü ve tane sınırlarının incelendiği görülmüştür (Şekil 9). Sb katkısının ise alaşımların mikro yapısında tane sınırlarının ağ örgüsü şeklinde ki yapısını parçaladığı gözlenmiştir. Dolayısıyla yavaş soğuma (A kademesi) şartlarında düzenli bir yapının geliştiği ve hızlı soğuma şartlarında (C kademesi) ise daha düzensiz bir yapının oluştuğu gözlenmiştir. Farklı literatür çalışmalarında da Mg alaşımlarının döküm sıcaklığı, et kalınlığı ve soğuma eğrisi gibi parametrelerinin farklı olması ile mikro yapılarda tane boyutu ve tane yapısı değerlerinde farklılık olduğu bulunmuştur (Hu et al., 2016; Laukli et al., 2003; Nave et al., 2000; Unal, 2014).



Şekil 9. AZ91 ve alaşımlarının SEM görüntüleri.

Alaşım	A Kademesi	C Kademesi
AZ91+%0.2 Sb		
AZ91+%0.5 Sb		
AZ91+%1.0 Sb		

şekil 9 (devam). AZ91 ve alaşımlarının SEM görüntüleri.

Mg_3Sb_2 fazı esas olarak Sb'nin Mg 'deki düşük katı znrlğ ve katılaşma sırasında Al ile Sb taşıyan fazın olmaması nedeniyle meydana gelmiştir (Boby et al., 2015). Balasubramani ve diğ. (Balasubramani et al., 2007), Mg_3Sb_2 fazının znme sıcaklığının, AZ91 alaşımının sıvılaşma sıcaklığının üstündeki 615oC olduğunu bildirmişlerdir. Bu, Mg_3Sb_2 fazının termal olarak daha kararlı olduğunu, dolayısıyla heterojen bir ekirdekleme merkezi olarak işlev gördüğünü ve tane boyutunu iyileştirmeye yardımcı olduğunu doğrulamaktadır (Boby et al., 2015).

5. Mekanik Test Sonuçları

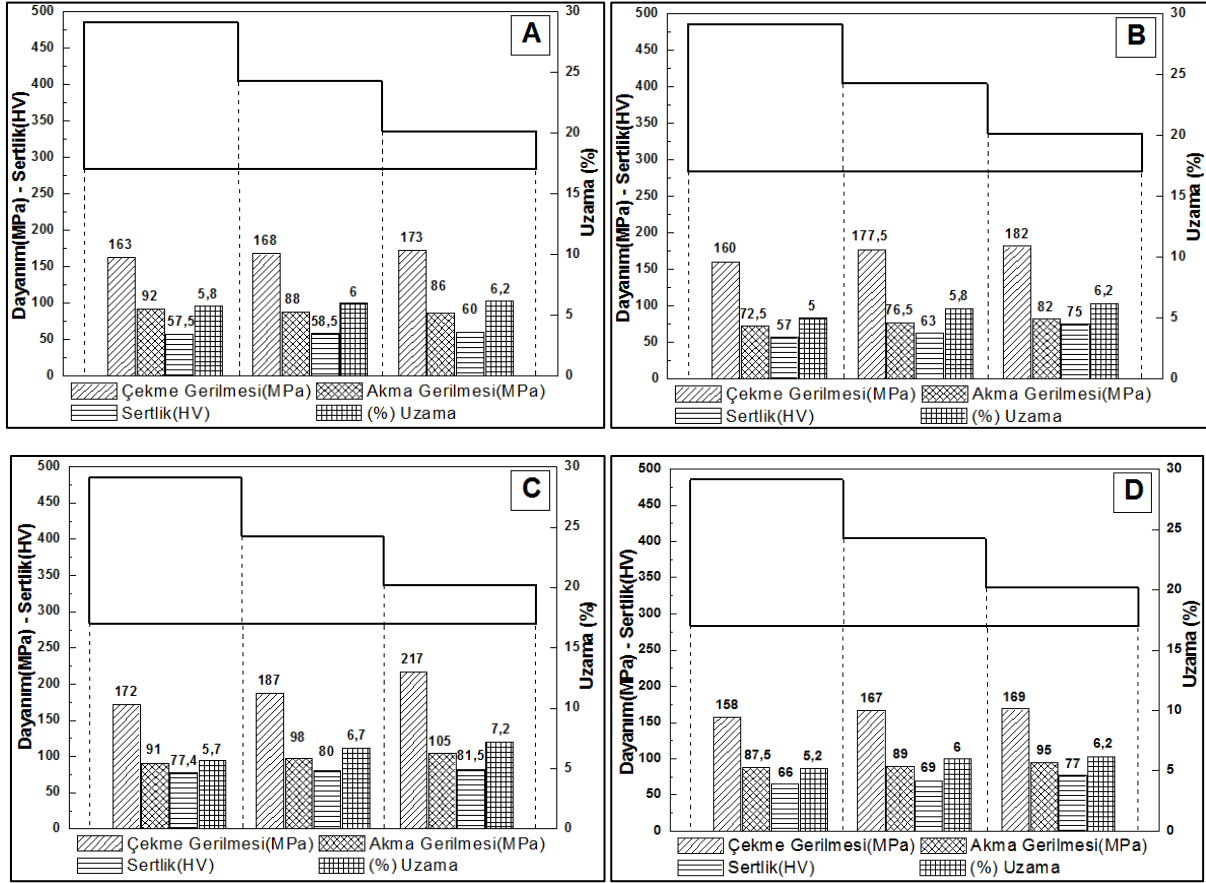
Master alaşım ve diğer alaşımlar üzerine yapılan çekme ve sertlik testleri sonuçları birleşik şekilde şekil 10'da sırasıyla verilmiştir. Mekanik özelliklerde şekil 10 (A) incelendiğinde AZ91 alaşımının kademeli döküm parçanın kesit kalınlığına bağlı olarak hızlı soğuması (A kademesinden C kademesine) ile çekme geriliminin ve sertliğin kademeli olarak arttığı gözlenmektedir.

AZ91 alaşımına Sb ilavesi ile yapı içerisinde Mg_3Sb_2 fazı oluşmuştur. Ayrıca Sb ilavesi β - $Mg_{17}Al_{12}$ fazının dağılımını, gelişimini ve sürekliğini de azalttığı gözlenmiştir. Boby ve ark. (Boby et al., 2015) Sb ilavesiyle önemli tane inceltme işlemi yapan, Mg matrisi için etkili bir ekirdekleme merkezi olarak hareket eden Mg_3Sb_2 fazının varlığına bağlı olduğunu rapor etmişlerdir. Bu bağlamda Sb ilavesi ile küçülen tane yapısından dolayı taneler arası çekim kuvvetinin yüksek olmasından dolayı da özellikle çekme değerliğinin Sb ilavesinin artışıyla kayda değer bir artış gösterdiği saptanmıştır.

şekil 10(B) incelendiğinde, AZ91'e %0.2 Sb ilavesi ile yapı içerisinde Mg_3Sb_2 intermetalik fazını oluşturmuş fakat ince okeltiler halinde yapıya dağılmıştır. Yapıya dağılmış olan bu fazın dislokasyon hareketlerini engellediği ve de buna bağlı olarak çekme değerliğinde artışa sebep olduğu tespit edilmiştir ve literatür de (Boby et al., 2015) benzer durumlar rapor edilmiştir. Ayrıca Sirinivasan ve ark. (Srinivasan et al., 2005; Srinivasan et al., 2010) yapmış oldukları çalışmalarda Sb ilaveli AZ91 alaşımlarının hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıkta gerilme özelliklerinin iyi olduğu ve plastik deformatsyonu arttırdığını rapor etmiştir.

AZ91 alaşımına %0.5 Sb ilavesinin mekanik özelliklerine etkisi Şekil 10(C) incelendiğinde, çok yüksek bir çekme dayanımının yanı sıra aynı şekilde optimum akma ve sertlik değerliklerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Wang ve ark. (Wang et al., 2001) yapmış oldukları çalışmada %0.5 Sb içeriğine sahip AZ91 alaşımının yüksek gerilme mukavemeti ve uzamasına sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Bir başka çalışmada ise (Boby et al., 2015), Sb ilavesi ile tane boyutu 106 μm 'den 76 μm 'ye düştüğü ve bu sayede ağırlıkça %0.5 Sb ilavesi olan AZ91 alaşımı için optimum gerilme özellikleri elde edildiği, mekanik özelliklerindeki artışlar temel olarak tane küçültme ve çökeltme kuvvetlendirmesinden kaynaklandığı rapor edilmiştir (Srinivasan et al., 2010). Dolayısıyla yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürle paralellik göstermektedir.

Sb oranının %1.0'e ulaşması ile AZ91 alaşımının mekanik özellikleri üzerine etkisi incelendiğinde Şekil 10(D), Sb miktarının artmasıyla (%1.0 ve üzerinde) daha belirgin hale gelen Mg_3Sb_2 fazının miktarı da belirgin bir şekilde artış göstererek matrisin dağılmasını sağlar ve buda gerilme mukavemeti ile uzama değerinin düşmesine sebep olur (Polmear, 1989; Westengen & Rashed, 2016). %0.5 Sb ilaveli alaşıma göre daha düşük değerlerde gerilme mukavemeti ve uzamaya sahip olduğu tespit edilmiştir ve yapılan diğer çalışmalar ile paralellik göstermektedir (Unal, 2014; Wang et al., 2001).



Şekil 10. AZ91 ve alaşımlarının mekanik özellikleri (A) AZ91, (B) AZ91+%0.2 Sb, (C) AZ91+%0.5 Sb, (D) AZ91+%1.0 Sb.

6. Bulgular ve Değerlendirme

Yapılan çalışmanın neticesinde, AZ91 alaşımında soğuma hızı taneler ve tane sınırları için önemli bir durum olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla soğuma hızının artması ile ince kademede tanelerin küçüldüğü ve tane sınırlarının da daha ince bir hal aldığı tespit edilmiştir. Böylelikle mikro yapıda görülen bu değişim neticesinde AZ91'in mekanik özelliklerinde bir artışın olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır. Deneysel sonuçlar neticesinde AZ91'in özellikle çekme değerlerinde soğuma hızına bağlı olarak (A kademesinden C kademesine), çekme dayanımında 163 MPa'dan 173 MPa'a bir artışın söz konusu olduğu tespit edilmiştir.

AZ91 alaşımına ilave edilen %0.2 değerinde Sb alaşımında ise mekanik özelliklerde dikkate değer bir artış sergilediği deneysel olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla çekme değeri soğuma hızına da bağlı olarak (A kademesinden C kademesine) 160 MPa dan 182 MPa'a, akma değeri 72,5 MPa dan 82 MPa'a, sertlik değeri 57 HV'dan 75 HV'a kadar ulaşmıştır. Uzama değeri ise yaklaşık olarak %25 artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Mekanik özelliklerde en iyi sonuçları AZ91'e %0.5 oranında Sb ilave edilen alaşım vermiştir. Soğuma hızına da bağlı olarak (A kademesinden C kademesine) çekme dayanımı 172 MPa'dan 217 MPa'a, akma değeri ise 91 MPa'dan 105 MPa'a ulaşırken, sertlik değeri 77,4 HV'dan 81,5 HV'a, %uzama değeri de 5,7'den yaklaşık %27'lik bir artışla 7,2 ye ulaşmıştır.

İlave edilen Sb miktarı %1.0 oranına çıkartıldığında ise mekanik özelliklerde, %0.5 Sb ilavesine kıyasla bir düşüşün olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak hızlı soğumanın da (A kademesinden C kademesine) etkisi ile çekme değeri 158 MPa ile 169 MPa

aralığında seyretmiştir. Akma dayanımı ise 87,5 MPa dan 95 MPa'a ulaşabilmiştir. Sertlik değeri 66 HV'tan 77 HV'a çıkmış ve son olarak %uzama değeri ise 5,2'den yaklaşık olarak %20'lik bir artış göstererek 6,2 değerine ulaşmıştır.

7. Sonuç ve Öneriler

Genel olarak AZ91 mikro yapısının α -Mg ana matrisi ve β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazlarından oluştuğu gözlenmiştir. Soğuma hızının artması mikroyapı morfolojisinde önemli değişimlere sebep olmuştur. Hızlı soğumada tane yapısı incelirken yavaş soğuma şartlarında ise daha kaba bir hal aldığı gözlenmiştir. Sb ilavesinin sonucunda ise, %1.0 oranına kadar optimum mekanik değerler elde edildiği ve özellikle de %0.5 Sb ilaveli alaşımda mekanik özellikleri oldukça yüksek değerlere taşıdığı gözlenmiştir ve Sb miktarının artışı ile birlikte mekanik özelliklerde gerilemenin başladığı gözlenmiştir.

Kullanım alanı olarak, özellikle %0.5 Sb ilaveli AZ91 alaşımı iyi mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle hava araçlarının dayanım gerektiren muhtelif yerlerinde kullanımının uygun olabileceği önerilebilir. Bununla birlikte otomobillerde de güç aktarma parçaları gibi spesifik ve dayanım gerektiren kısımlarında kullanılabileceği önerilebilir.

AZ91 alaşımının Sb ile olan alaşımlama sayıları daha fazla artırılabilir. Yapılmış olan çalışma sonucunda elde edilen numunelere homojenleştirme ve çökelti sertleşmesi sonrası gibi işlemler ile mekanik özelliklerin değişimi incelenmesi önerilebilir.

Referanslar

Agarwal, S., Curtin, J., Duffy, B., & Jaiswal, S. (2016). Biodegradable magnesium alloys for orthopaedic applications: A review on corrosion, biocompatibility and surface modifications. *Materials Science and Engineering: C*, 68, 948-963. doi:10.1016/j.msec.2016.06.020

Ali, Y., Qiu, D., Jiang, B., Pan, F., & Zhang, M.-X. (2015). Current research progress in grain refinement of cast magnesium alloys: a review article. *Journal of Alloys and Compounds*, 619, 639-651. doi:10.1016/j.jallcom.2014.09.061

Balasubramani, N., Srinivasan, A., Pillai, U., & Pai, B. (2007). Effect of Pb and Sb additions on the precipitation kinetics of AZ91 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 457(1-2), 275-281. doi:10.1016/j.msea.2006.12.132

Bamberger, M. (2013). Structural refinement of cast magnesium alloys. *Materials Science and Technology*, 17(1), 15-24. doi:10.1179/026708301101509061

Barber, L. P. (2004). Characterization of the solidification behavior and resultant microstructures of magnesium-aluminum alloys. (MS), Worcester Polytechnic Institute, (etd-12234-112022)

Boby, A., Srinivasan, A., Pillai, U. T. S., & Pai, B. C. (2015). Effect of Sb, Sn and Pb additions on the microstructure and mechanical properties of AZ91 alloy. Paper presented at the Materials Science Forum.

Carbonneau, Y., Couture, A., Van Neste, A., & Tremblay, R. (1998). On the observation of a new ternary MgSiCa phase in Mg-Si alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29(6), 1759-1763.

Čížek, L., Greger, M., Dobrzański, L., Juříčka, I., Kocich, R., Pawlica, L., & Tański, T. (2006). Mechanical properties of magnesium alloy AZ91 at elevated temperatures. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 18(1-2), 203-206.

Çiçek, B., Ahlatçı, H., & Sun, Y. (2013). Wear behaviours of Pb added Mg-Al-Si composites reinforced with in situ Mg₂Si particles. *Materials & Design*, 50, 929-935. doi:10.1016/j.matdes.2013.03.097

Çiçek, B., & Sun, Y. (2012). A study on the mechanical and corrosion properties of lead added magnesium alloys. *Materials & Design*, 37, 369-372. doi:10.1016/j.matdes.2012.01.029

Ding, Y., & Ju, D. (2018). Finite Element Analysis of Residual Stress in the Diffusion Zone of Mg/Al Alloys. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.

Falcon, L., Bedolla, B., Lemus, J., Leon, C., Rosales, I., & Gonzalez-Rodriguez, J. (2011). Corrosion behavior of Mg-Al/TiC composites in NaCl solution. *International Journal of Corrosion*. doi:10.1155/2011/896845

Gaines, L., Cuenca, R., Wu, S., & Stodolsky, F. (1996). Potential automotive uses of wrought magnesium alloys. Paper presented at the Conference: 2. Argonne National Laboratory technical women's symposium, Argonne, IL (United States), 29-30 Apr 1996; Other Information: PBD: [1996].

Gray, J., & Luan, B. (2002). Protective coatings on magnesium and its alloys—a critical review. *Journal of Alloys and Compounds*, 336(1-2), 88-113.

- Guangyin, Y., Yangshan, S., & Wenjiang, D. (2000). Effects of Sb addition on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy. *Scripta Materialia*, 43(11), 1009-1013.
- Guangyin, Y., Yangshan, S., & Wenjiang, D. (2001). Effects of bismuth and antimony additions on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 308(1-2), 38-44.
- Hu, L., Chen, D., Shi, F., Chen, S., & Meng, Q. (2016). Effect of die-casting cooling rate on the chemical conversion treatments of AZ91D magnesium alloy. *International Journal of Cast Metals Research*, 29(6), 355-361.
- Jiang, J., Wang, Y., Qu, J., Du, Z., Sun, Y., & Luo, S. (2010). Microstructure evolution of AM60 magnesium alloy semisolid slurry prepared by new SIMA. *Journal of Alloys and Compounds*, 497(1-2), 62-67.
- Kazdal, H. (1999). *Magnezyum Alaşımları: Otomotiv Endüstrisinde Uygulaması ve Geleceği*. Tubitak, Marmara Araştırma Merkezi, Kocaeli, 3-39.
- Laukli, H., Lohne, O., Sannes, S., Gjestland, H., & Arnberg, L. (2003). Grain size distribution in a complex AM60 magnesium alloy die casting. *International Journal of Cast Metals Research*, 16(6), 515-521.
- Lee, S., Lee, S. H., & Kim, D. H. (1998). Effect of Y, Sr, and Nd additions on the microstructure and microfracture mechanism of squeeze-cast AZ91-X magnesium alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29(4), 1221-1235.
- Lee, Y., Dahle, A., & StJohn, D. (2000). The role of solute in grain refinement of magnesium. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 31A(11), 2895-2906. doi:10.1007/BF02830349
- Mordike, B., & Ebert, T. (2001). Magnesium: properties—applications—potential. *Materials Science and Engineering: A*, 302(1), 37-45. doi:10.1016/S0921-5093(00)01351-4
- MÖ, P. (1992). Magnesium alloying, some potentials for alloy development. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 42(12), 679-686.
- Nave, M., Dahle, A., & StJohn, D. (2000). The effect of solidification rate on the structure of magnesium-aluminium eutectic grains. *International Journal of Cast Metals Research*, 13(1), 1-7.
- Park, W., Park, H., Kim, D., & Kim, N. J. (1994). Structure and decomposition behaviour of rapidly solidified Mg Nd X (X, Al, Si) Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 179, 637-640.
- Pekguleryuz, M. O., & Kaya, A. A. (2003). Creep resistant magnesium alloys for powertrain applications. *Advanced engineering materials*, 5(12), 866-878. doi:10.1002/adem.200300403
- Polmear, I. (1989). *Light alloys- Metallurgy of the light metals*.
- Polmear, I. (1996). Recent developments in light alloys. *Materials transactions, JIM*, 37(1), 12-31.
- Song, G., & Song, S. (2007). A possible biodegradable magnesium implant material. *Advanced engineering materials*, 9(4), 298-302. doi:10.1002/adem.200600252
- Srinivasan, A., Pillai, U., & Pai, B. (2005). Microstructure and mechanical properties of Si and Sb added AZ91 magnesium alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36(8), 2235-2243.
- Srinivasan, A., Swaminathan, J., Gunjan, M., Pillai, U., & Pai, B. (2010). Effect of intermetallic phases on the creep behavior of AZ91 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 527(6), 1395-1403.
- Staiger, M. P., Pietak, A. M., Huadmai, J., & Dias, G. (2006). Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: a review. *Biomaterials*, 27(9), 1728-1734. doi:10.1016/j.biomaterials.2005.10.003
- Suh, J., Victoria-Hernandez, J., Letzig, D., Golle, R., Yi, S., Bohlen, J., & Volk, W. (2015). Improvement in cold formability of AZ31 magnesium alloy sheets processed by equal channel angular pressing. *Journal of Materials Processing Technology*, 217, 286-293. doi:10.1016/j.jmatprotec.2014.11.029
- Unal, M. (2008). *An investigation of casting properties of magnesium alloys*. (Ph. D. Thesis), Gazi University, Ankara, Turkey. (212936)
- Unal, M. (2014). Effects of solidification rate and Sb additions on microstructure and mechanical properties of as cast AM60 magnesium alloys. *International Journal of Cast Metals Research*, 27(2), 80-86. doi:10.1179/1743133613Y.0000000082

Wang, Q., Chen, W., Ding, W., Zhu, Y., & Mabuchi, M. (2001). Effect of Sb on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(13), 787-794.

Westengen, H., & Rashed, H. (2016). *Magnesium Alloys: Alloy and Temper Designation System*: Elsevier.

Witte, F., Ulrich, H., Rudert, M., & Willbold, E. (2007). Biodegradable magnesium scaffolds: Part 1: appropriate inflammatory response. *Journal of biomedical materials research Part A*, 81(3), 748-756. doi:10.1002/jbm.a.31170

Wolff, M., Schaper, J., Dahms, M., Ebel, T., Kainer, K., & Klassen, T. (2014). Magnesium powder injection moulding for biomedical application. *Powder Metallurgy*, 57(5), 331-340. doi:10.1179/1743290114Y.0000000111

Zhang, Z. (2000). Development of magnesium-based alloys for elevated temperature applications. (Doctoral Thesis), Genie Universities, Quebec-Canada.



İmge Kümeleriyle Yüz Tanıma için Otomatik Önişleme

Autonomous Preprocessing for Image Set Based Face Recognition

Hasan Serhan Yavuz¹ , Meltem Seyirt² 

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir, TÜRKİYE

²TÜBİTAK BİLGEM, Barış Mah. Dr. Zeki Acar Cad. No:1 PK: 74, 41470, Gebze / Kocaeli, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 09/01/2019

Kabul/Accepted: 26/03/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Otomatik yüz tanıma süreci son yıllarda popülerliğini arttırmış bir konudur. İmge tabanlı yaklaşımların hâkim olduğu yüz tanıma süreci, kamera ve hesaplama teknolojilerinin gelişimiyle yerini video tabanlı yaklaşımlara bırakmaktadır. Video tabanlı yüz tanıma uygulamalarında, özellikle kişilerin farklı aydınlatma veya cepheden, yandan görünüm vb. farklı pozlar içeren imge kümelerinin eşleştirilmesi zorluklar içermektedir. Bu çalışmada, özellikle aydınlatma ve poz çeşitliliklerinin var olduğu durumlarda, küme tabanlı yüz tanıma yöntemlerinin başarımlarının nasıl iyileştirilebileceği araştırılmıştır. Ön işleme basamağında, aydınlatma farklılıklarını giderildikten sonra imgeler öncelikle yüz pozuna göre sınıflandırılmıştır. Pozlara göre ayrıştırılan yüzler, sınıf içi değişimlerinin azaltılması için ilgili pozun şablonuna hizalanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, önişleme basamağında önerilen otomatik poz hizalama yöntemi kullanıldığında, video tabanlı yüz tanıma deneylerinin başarımlarında gelişmeler sağlandığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Yüz sezimi, yüz hizalama, yüz tanıma, imge kümeleri”

Abstract

Automatic face recognition process has become a popular topic in recent years. The facial recognition process, where previously single-image based methods were more common, has started to leave its place in video-based approaches by the development of camera and computing technologies. In video based recognition applications, it becomes more difficult to match the image sets of the same person whose frames captured under different illumination conditions or when the compared frames include different face poses such as frontal versus profile. In this study, we investigate how to improve the accuracies of set based face recognition methods in case of lighting and face pose variations. At the pre-processing stage, after the illumination differences are refined, the images are firstly classified according to face exposure. The faces that are separated according to the poses are aligned to the corresponding canonical pose patterns to reduce intra class variations. Experimental results demonstrate that set based recognition methods give higher correct recognition rates when the proposed methodology schemes have been applied as a preprocessing stage.

Key Words

“Face detection, face alignment, face recognition, image sets”

1. Giriş

Bilgisayar ortamında bir kişinin kimliğinin tespit edilebilmesi için birçok biyometrik özellik kullanılabilir. Yüz biyometrisi, bireyin yüz imgelerinin bir kamera ile kolay bir biçimde yakalanabilmesiyle gerçekleştirildiği için son zamanlarda tercih edilen bir biyometrik kimlik tespit sistemidir (Tistarelli & Champod, 2017). Yüz tanıma, askeri, güvenlik ve hukuki amaçların yanı sıra personel katılım/devam takibi gibi ticari amaçlarla kullanılabilen geniş bir uygulama sahasına sahiptir. Popüler bir araştırma konusu olmasına rağmen aydınlatma farklılıkları, kamera açısı veya yüzün hareket ettirilmesi ile oluşan poz değişimleri (yüz dönmeleri vs.), yüzdeki kısmi kapanmalar, doğal görünümlerdeki farklılıklar (sakal, bıyık, yoğun makyaj vs.) yüz tanıma sistemlerinin başarımlarını olumsuz yönde etkilemektedir (Hassaballah & Aly, 2015).

Görünüş tabanlı bir otomatik yüz tanıma sistemi genellikle dört ana bileşenden oluşmaktadır: yüz algılama, hizalama, öznelik çıkarma ve sınıflandırma (Li & Jain, 2011). Geleneksel yüz tanıma yöntemlerinde her bir yüz imgesi bir veri örneği olarak ele alınmaktadır. Veri sınıflarının ayrıştırılması da ayırt edici alt uzaylar belirlenerek yapılmaktadır. Buradaki en önemli problem veri boyutunun oldukça büyük olması (örnek olarak 100×90 boyutlarındaki gri seviye bir yüz imgesi, \mathbb{R}^{9000} uzayında bir vektör olarak temsil edilmektedir) ve örnek sayısının oldukça küçük olmasıdır (genellikle veritabanında bir bireye ait olan sadece birkaç adet imge mevcuttur). Bu problemlerin üstesinden gelen ve görünüş tabanlı yüz tanıma sistemlerinin en klasik yöntemleri olarak bilinen yöntemler temel bileşen analizi (Principal Component Analysis-PCA) (Turk & Pentland, 1991) ve doğrusal diskriminant analizi (Linear Discriminant Analysis-LDA) (Chelali et al., 2009) tabanlı yöntemlerdir. Bu tür yaklaşımlarda, eğitim verilerinden elde edilen optimal alt uzaylar kullanılarak yüz imgeleri sınıflandırılır. İlerleyen yıllarda bu yöntemlerin doğrusal olmayan versiyonları (Kernel PCA (Scholkopf et al., 1997) ve Kernel LDA (Mika et al., 1999)) ve bunların birçok varyantları (Li et al., 2009; Liu, 2004; Lu et al., 2003; Nhat & Lee, 2007) önerilmiştir. Bu yöntemler genellikle fazla sayıda sınıf içermeyen durumlarda ve özellikle gri seviye öznelikleri yerine, veri uzayı üzerine izdüşürüldüğünde daha iyi ayrıştırılabilen Gabor dalgacık öznelikleri (Vinay et al., 2015), EGMB (elastic graph bunch matching) (Wiskott et al., 1997) veya LBP (local binary patterns) (Ahonen et al., 2006) öznelikleri ile kullanıldığında oldukça başarılı sonuçlar vermektedir.

Yüz tanımda tekil imgeleri kullanan klasik yöntemlerin etkinlikleri sınıf sayısı çoğaldığında veya sınıf içi imge varyasyonları fazlaştığında (örneğin veritabanında bir bireye ait az sayıda yüz imgesi yerine aynı kişiye ait aydınlatma şiddeti farklılıkları, poz görünüş farklılıkları içeren yüzlerce imge bulunması durumunda) azalmaktadır. Bu durumlarda, yakın geçmişte önerilmiş olan ve tekil imgelerden alt uzaylar oluşturmak yerine, aynı sınıfa ait olan imgelerin birleşimini bir imge kümesi olarak ele alıp, imge kümelerini modelleyen küme tabanlı yaklaşımlar kullanılmaktadır (Lu et al., 2017; Yang et al., 2017; Zhao et al., 2018). Küme tabanlı yaklaşımlarda, küme modellemeleri genellikle ayrık imgelerin bir öznelik uzayında noktalar biçiminde, imge kümelerinin ise küme içindeki noktaları içine alan bölgeler biçiminde temsil edilmesiyle gerçekleştirilir. Böylece, her bir kimlik çok boyutlu öznelik uzayında bir bölge biçiminde modellenmiş olur. Sorgu kümesi sınıflandırılması, sorgu kümesi imge modeli ile eğitilen kimlik imge modellerinin geometrik uzaklıklarına bakılarak yapılır. En yakın uzaklıkta olan kimlik modeli, sorgulanan imge kümesi ile eşleştirilir. İmge kümeleri tabanlı yöntemlerin en büyük avantajı yüz imgelerine doğal koşullar altında ulaşılabilir özelliğidir. Standart ve kontrollü ortamlar yerine video kamerasının yerleştirildiği herhangi bir noktadan kayıt yapılabilen ve yeterli büyüklüklerde veri elde edilebilmektedir.

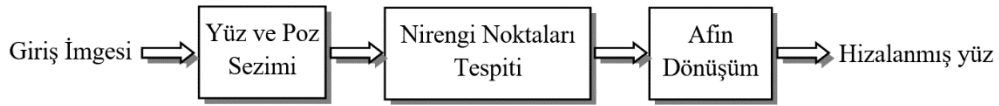
Video görüntüleri tekil imgelere göre çok daha fazla bilgi içermektedir. Bu da yüz tanıma sistemlerinde başarımları artırıcı yönde etki göstermektedir. Ayrıca büyük veri işleme kapasitesi günümüzdeki teknolojiyle çok daha kolay hale gelmiştir. Cevikalp ve Triggs (2010) tarafından önerilen yöntemde, video görüntülerinden elde edilen imge dizilerine hesapsal yaklaşımlar, imge kümeleri ile yüz tanımanın temellerini oluşturmaktadır. İmge kümeleri kullanılan sistemlerde kişi sınıfları imge kümelerinden öğrenilen alt uzaylarla temsil edilirler (Wang et al., 2009). Alt uzaylar Öklid olmayan, Grassmann manifold ya da eğrisel Riemann manifold olarak bilinen biçimdedir ve imgeler bu alt uzaylarda birer nokta ile, imge kümeleri ise kümeye ait olan noktaların birleşiminden oluşan bölgelerle temsil edilir (Harandi et al., 2013). Kişilere ait imge kümelerinin sınıflandırılması için bazı benzerlik ölçütleri kullanılır ve karşılaştırma gerçekleştirilir. Benzerlik ölçüsü olarak doğrusal uzaylar kullanılmışsa açısal uzaklıklar, afin uzaylar kullanılmışsa geometrik uzaklıklar (bölgeler arası en yakın mesafe uzunluğu) kullanılmaktadır. İmge kümeleri tabanlı yöntemlerin farklılıkları nokta bu kümelerin modellemesi ve kümeler arası uzaklık ölçüsüdür.

İmge kümeleri ile yüz tanıma çalışmalarında karşılaşıldığı kadarıyla imge kümeleri oluşturulurken yüz sezme algoritmalarının döndürdüğü çıktılar ya hiç hizalanmadan ya da kısmen insan eliyle hizalanarak kullanılmıştır. Yüz tanıma başarımında yüz hizalamanın etkisi önemli olabilmektedir (Shi et al., 2018). Kameradan yakalanan görüntülerde yüzün kameraya uzaklığına göre değişim gösteren ölçekleme farklılıkları, yüzün dönme açısı veya eğiklikleri anıma başarımlarını etkilemektedir. Yüksek tanıma oranları elde etmenin bir yolu kanonik bir yüz şablonu belirleyip, bireylerin yüzlerindeki göz, burun veya ağız gibi çeşitli nirengi noktalarının her birey için şablonda tasarlanan yerleşkelere ölçekleme, kaydırma ve döndürme gibi temel doğrusal konformal dönüşümler kullanılarak haritalanmasıdır. Yapılan bazı çalışmalarda bu konunun önemi literatürde yer alan çalışmalarda denenmiş ve rapor edilmiştir (Yavuz, et al., 2013).

Bu çalışmada, video görüntülerinden yakalanan yüz imgeleri kullanılarak yüz tanıma uygulaması yapılmıştır. Farklı aydınlatma ve yüksek poz çeşitlilikleri altında kaydedilen video görüntüleri üzerine bir ön işleme yöntemi tanımlanmış; bu sayede aydınlatma ve poz farklılıklarının doğru tanıma üzerindeki olumsuz etkisi azaltılmaya çalışılmıştır. Önerilen yöntem ikinci bölümde tanımlanmıştır. Deneysel çalışmalar, bulgular ve tartışma üçüncü bölümde verilmiştir. Dördüncü bölümde çalışmanın ana sonuçları özetlenmiştir.

2. Yöntem

Otomatik yüz hizalama süreci geleneksel olarak yüz sezimi, sezilen yüz bölgesi içinde göz, ağız gibi bazı önemli noktaların bulunması ve yüz bölgesinin önceden belirlenen bir yüz şablonuna haritalanması biçiminde gerçekleştirilir. Yüz sezicilerin başarımları, kameranın yüze bakış açısı, aydınlatma şiddeti farklılıkları, yüz görünümünü kapatan diğer nesnelere varlığı gibi durumlardan olumsuz yönde etkilenmektedir. Genellikle ortalama ışık altında ve ön cephe görünümü pozlarda tüm seziciler çok başarılı sonuçlar döndürmesine rağmen poz açısı değiştiğinde yöntemlerin başarımları düşmektedir. Poz değişikliklerine ilave olarak yüksek ışık veya karanlık ortamlarda alınan çekimlerde yukarıda bahsedilen sezici yöntemlerin başarımları oldukça kötüleşmektedir. Bu çalışmada, özellikle aydınlatma farklılıkları ve poz çeşitlilikleri söz konusu olduğunda, otomatik yüz hizalama gerçekleştirmek üzere, Şekil-1'de blok diyagramı verilen dört aşamalı ön işleme yöntemi önerilmiştir. Giriş imgesinde ilk olarak Haar benzeri öznelikler (Lienhart & Maydt, 2002) kullanarak eğitimi gerçekleştirdiğimiz bir yüz sezici algoritma ile imgedeki yüz bölgesi belirlenir. Tespit edilen yüz bölgesi kesildikten sonra yüz bölgesindeki gölgelenmeler gibi tanıma üzerinde olumsuz etki oluşturabilecek aydınlatma farklılıklarının etkisini ortadan kaldırmak için histogram eşitleme yapılır. Bir sonraki aşamada, yüzdeki nirengi noktaları tespit edilir. Bu noktaların konumları kullanılarak yüzün önceden belirlenmiş olan yedi poz kategorisindeki hangi poz sınıfına ait olduğu tespit edilir. Son aşamada ise yüzdeki nirengi noktaları, ilgili poz sınıfındaki kanonik şablon konumlarına eşleşecek şekilde bir konformal dönüşüm üzerinden geçirilerek yüz hizalama tamamlanır.

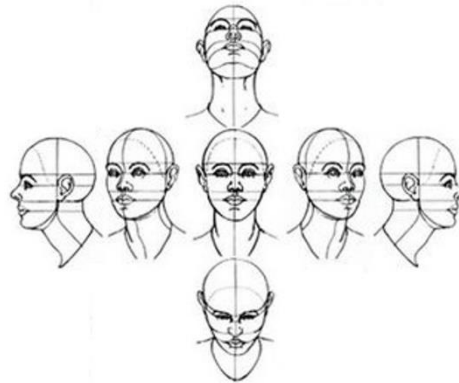


Şekil 1. Ön işleme yöntemi basamakları

2.1. Yüz ve Poz Sezimi

Yüz sezimi, imge içindeki yüz bölgelerinin tespit edilmesi olarak tanımlanır ve yüz sezme amacıyla kullanılan çok farklı yöntemler mevcuttur (Yang et al., 2002). Bu yöntemler içinde başarımları ve hız performansı oldukça iyi olan Viola-Jones yüz sezicisi (Viola & Jones, 2001) bilinen en etkili yüz sezicilerindendir. Etkili diğer bazı yüz sezici algoritmalarında, yüz bölgesi tespit edilirken yüzü oluşturan önemli nirengi noktaları da tespit edilebilmektedir (Xiong & De La Torre, 2013; Zhu & Ramanan, 2012). Genellikle göz, kaş, ağız, burun ve yüz sınırından oluşan bu noktalar, yüzle ilgili detaylı bilgiler de sunmaktadır. Son zamanlarda konvolüsyonel sinir ağları mimarisine dayanan derin öğrenme tekniklerinin nesne tespiti uygulamalarında kullanımıyla oldukça başarılı yüz sezicileri tasarlanmıştır. Açık kaynak kodlu bir yazılım olarak da kullanıcılarla paylaşılan Face++ yöntemi (Zhou et al., 2013) yüz sezimi ve nirengi noktaları tespit edilmesinde oldukça başarılıdır.

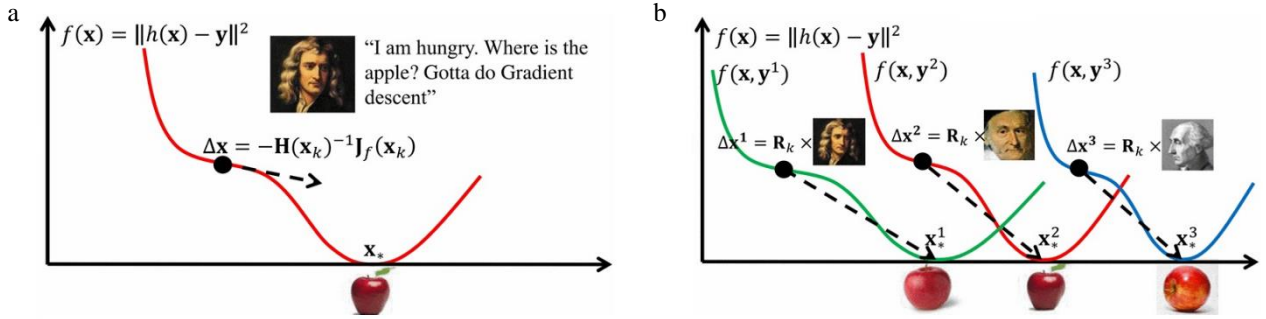
Yüksek aydınlatma farklılıkları ve pozlama çeşitlilikleri altında bahsedilen yöntemlerin yüz sezimi probleminde bazı durumlarda yetersiz kaldığı gözlenmiştir. Bu yüzden elde edilen veriler de kullanılarak, zor koşullar altında da başarılı sezimler yapabilen bir yüz sezicisi eğitilmiştir. Öncelikli olarak yüz sezimi problemi, 7 sınıflı bir nesne sezimi problemi olarak ele alınmıştır. Her bir sınıf, bir poz kategorisi sınıfı olarak tasarlanmıştır ve poz sınıfı temsili görselleri Şekil 2'de verilmiştir. Sınıflar: 1)Ön cephe, 2)yarım sol profil, 3)tam sol profil, 4)yarım sağ profil, 5)tam sağ profil, 6)yukarı bakış 7)aşağı bakış biçimindedir. Böylece bu nesne sınıflarından birisi sezildiğinde hem yüz sezimi hem de ilgili yüzün poz tespiti yapılmaktadır.



Şekil 2. Temsili poz sınıfları, toplam 7 sınıf (Sakarya, 2013).

2.2. Şablona Haritalama

Şablona haritalama süreci, sezilen yüz bölgesindeki göz, ağız, burun ve benzeri nirengi noktalarının tespit edilmesi ve tespit edilen noktaların önceden belirlenmiş olan bir kanonik şablona haritalanması işlemlerinden oluşmaktadır. Yüz sezimi başarıyla yapıldıktan sonra, yüzdeki nirengi noktalarının tespit edilmesi daha kolay bir problemidir. Bu konuda yapılan çeşitli çalışmalar mevcuttur (Wu & Ji, 2018). Değişken veya sabit sayılarda tespit edilen nirengi noktalarının konumları, yüz tanıma problemlerinde doğrudan öznel olarak veya bu konumlarla belirlenen bölgelerden öznel olarak çıkarılarak kullanılmaktadır. Biz bu çalışmada nirengi noktalarının konumlarını yüz hizalama amacıyla kullanmaktayız. Bu yüzden, nirengi noktalarını tespit etmek için bu konuda oldukça başarılı olan; sabit sayıda nirengi noktası konumu döndüren ve açık kaynak kodlu olarak akademik kullanıma sunulan INTRAFACE (Intraface, 2018) yöntemini kullandık. Bu yöntem eğitmenli iniş metodu (Supervised Descent Method-SDM) kullanılmaktadır (Xiong & De La Torre, 2013). Denetimli bir şekilde genel iniş haritaları öğrenerek, nirengi noktalarını başarılı bir şekilde tespit edebilmeyi amaçlar. Yöntemin ana fikri Şekil 3’de özetlenmiştir.



Şekil 3. Eğitmenli iniş yönteminin özeti (Xiong & De La Torre, 2013)

Şekil 3.a’da doğrusal olmayan en küçük kareler probleminin Newton yöntemiyle çözümü gösterilmektedir. Burada $f(\mathbf{x})$ imge özneliklerini içeren doğrusal olmayan fonksiyon, \mathbf{y} bilinen bir vektör (şablon) ve \mathbf{x} hareket parametreleri (döndürme, ölçek, katı olmayan hareket) olmak üzere geleneksel Newton yöntemiyle Hessian ve Jacobian matrisleri hesaplanmaktadır. Şekil 3.b’de ise Eğitmenli İniş Metodunun genel yapısı betimlenmiştir. Eğitim verisinde gerçek nirengi konumları bilinen farklı örnekler için bir dizi fonksiyon $\{f(\mathbf{x}, \mathbf{y}^i)\}$ oluşmakta ve minimum değerler (\mathbf{x}_*^i) bilinmektedir. SDM bu eğitim verisini kullanarak doğrusal olmayan en küçük kareler fonksiyonlarının her birinin ortalamalarını minimize eden parametre güncellemeleri serisini öğrenir. Bu parametre güncellemeleri iki bölüme ayrılır; örneğe özgü bileşen ve genel iniş yönü (\mathbf{R}_k). SDM eğitim sırasında genel iniş yönünü bulur. Test sırasında ise aranan optimum \mathbf{x} , verilen \mathbf{y} vektörü için eğitimde bulunan genel iniş yönünde \mathbf{y} ’ye özgü bileşene haritalanmasıyla hesaplanır. Yöntemle ilgili detaylı bilgilendirme için bkz. (Xiong & De La Torre, 2013).

Yüz bölgesinde N adet nirengi noktasının konumları tespit edildikten sonra, şablona haritalama süreci 6 parametrelili afin dönüşüm kullanılarak yapılmıştır. Basit olarak ifade etmek gerekirse, birinci imgede bulunan nirengi noktalarının konumları (x_i, y_i) , $i=1,2,\dots,N$ ve aynı noktaların hedef şablondaki yeni konumları $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$, $i=1,2,\dots,N$ olsun. Uygulanan afin dönüşüm, $\mathbf{p}=(x_i, y_i, 1)$ konumunu, $\tilde{\mathbf{p}}=(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, 1)$ konumuna haritalamak üzere tasarlanmakta ve Denklem 1’de gösterildiği şekilde sadeleştirilmektedir.

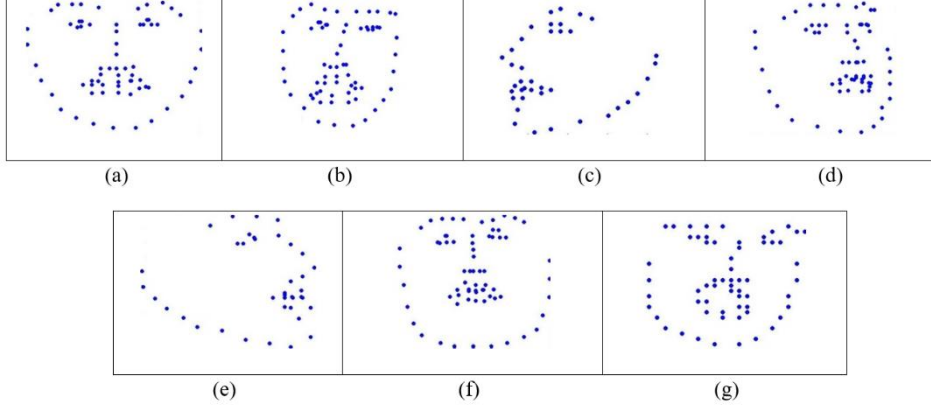
$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ x_N & y_N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \tilde{x}_N \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ x_N & y_N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \tilde{y}_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

Bu eşitlik sistemi $N \geq 3$ için, en küçük hata kareleri toplamı çözümü kullanılarak, dönüşüm parametrelerini $(a_{11}, a_{12}, a_{13}; a_{21}, a_{22}, a_{23})$ hesaplamak üzere çözdürülmektedir. Elde edilen dönüşüm matrisi \mathbf{T} ile gösterildiğinde, Denklem 2’de verildiği formda olacaktır. Nirengi noktalarının konumları kullanılarak hesaplanan bu dönüşüm, yüz imgesindeki diğer tüm konumlara uygulandığında yüz imgesi, belirlenen şablona göre hizalanmış olur.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Bu çalışmada 7 poz kategorisi belirlendiği için her bir poz kategorisinin şablonu farklıdır. Yüz imgeleri, önceki bölümde verilen yüz ve poz sezimi süreci çıktısı olarak hangi poz kategorisi olarak sınıflandırılmışlarsa, ilgili kategorideki şablona haritalanmaktadır. Poz kategorilerinin kanonik şablonları ise tarafımızca manuel olarak yapılan deneylerde elde edilen konumların ortalamaları alınarak belirlenmiştir. Bunun için öncelikle veritabanından yüz biçimleri farklı olan 30 kişi seçilmiş ve

bu bireylerin 7 farklı poz kategorisindeki 10'ar imgeleri kullanılarak nirengi noktaları INTRAFACE algoritmasıyla tespit edilmiştir. Nirengi noktaları belirlenen yüz imgelerinde ilave olarak yüz bölgesini belirleyen dikdörtgen çerçeve kenarları elle işaretlenmiştir. Yüz bölgesi dikdörtgenin uzun kenar ve kısa kenar uzunlukları oranı sabit olacak şekilde standart bir değere ölçeklenmiş ve nirengi noktalarının merkezi referans noktası olacak şekilde bir çerçeveye oturtulmuştur. Tüm imgeler için nirengi noktaları konumlarının ortlaması, kanonik şablon nirengi noktası olarak kabul edilmiştir. Her bir poz sınıfı için ortaya çıkan kanonik şablonlar Şekil 4'de verilmiştir. Bu şablonlardaki her bir nokta, Denklem-1'de konumu (\hat{x}_i, \hat{y}_i) biçiminde tanımlanan değişkenlerdir.



Şekil 4. Poz sınıfları için kanonik şablonlar: (a) ön cephe, (b) yarım sol, (c) tam sol, (d) yarım sağ, (e) tam sağ, (f) yukarı, (g) aşağı.

3. Yüz Tanıma Deneyleri

İmge kümeleri tabanlı yüz tanıma uygulamaları, video görüntülerinden yüz kareleri yakalayıp her bir videoyu bir imge kümesi olarak modelleme amacı güder. Bu uygulamalar yakın zamanlarda literatürde denenmeye başlamıştır ve tanıma performansları genellikle Honda/UCSD (Lee et al., 2005), MoBo (Gross & Shi, 2001) ve Youtube Celebrities (Kim et al., 2008) gibi küçük hacimli veri kümeleri üzerinde test edilmiştir. İmge kümeleri oluşturulurken, çalışmaların çoğunda yüz sezicinin döndürdüğü çıktılar, herhangi bir ilave işleme yapılmadan kullanılmaktadır. Fazla sayıda katılımcı içeren, büyük hacimli ve aydınlatma şiddeti ve poz farklılığı gibi zorlayıcı durumlar içeren videolar söz konusu olduğunda küme tabanlı tanıma yöntemlerinin başarımları düşmektedir. Bu çalışmada, küme tabanlı yüz tanıma yöntemlerinde imge kümeleri oluşturulurken, önerilen yöntemle hizalanmış yüz imgeleri kullanıldığında tanıma yöntemlerinin başarımları üzerinde olumlu etkileri olup olmadığı araştırılmıştır. Deneyler, geniş hacimli ve zorlayıcı durumları içinde barındıran ESOGÜ-285 video veritabanı üzerinde gerçekleştirilmiştir.

3.1. Veritabanı

ESOGU-285 video veritabanı (Yalcin et al., 2015), yüz ve mimik çeşitliliklerini içeren kısa videolardan (yaklaşık 1 dakikalık süreler) oluşmaktadır. Bireylerin, iki farklı oturumda, 4'er farklı senaryo altında video çekimleri mevcuttur. Birinci senaryo, Honda/UCSD veritabanının tasarımına benzetilerek doğal ışık ortamında kişinin yüzünü yavaşça sağa, sola ve aşağı yukarı hareket ettirerek yüzün çeşitli açılardan görüntülediği senaryodur. İkinci senaryo, yine doğal ışık ortamında ancak bu kez konuşma ve mimiklerin yoğun olarak canlandırıldığı bir senaryodur. Üçüncü ve dördüncü senaryolar birinci senaryonun benzeridir. Üçüncü senaryoda katılımcının sol tarafında kalan projeksiyon lambası; dördüncü senaryoda katılımcının sağ tarafında kalan projeksiyon lambası açılarak görüntüler kaydedilmiştir. Projeksiyon lambalarının sadece bir taraftan açık olması, yüzün diğer yarısında büyük gölgeler oluşturmakta ve yüz tanıma problemini zorlaştırmaktadır. Veritabanında, 285 kişi için iki oturumda 4'er senaryo (toplam 8 senaryo) çekimlerinden oluşturulan veritabanı 2280 videodan oluşmaktadır. Veritabanından bir oturum için senaryo örnekleri Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. ESOGU-285 video veritabanındaki 4 temel senaryo

3.2. İmge Kümeleri Tabanlı Tanıma Yöntemleri

İmge kümeleri tabanlı yüz tanıma kavramı, ilk olarak Cevikalp and Triggs (2010) tarafından önerilmiştir. Genellikle bir videodan yakalanan aynı bireye ait yüz imgeleri, basit geometrik yapılar (afin veya konveks zarflar) kullanılarak modellenir. Eğitim aşamasında, eğitim verileri ile öğrenilen modeller, test aşamasında test verisi ile karşılaştırılırken geometrik yapılar (manifoldlar) arasındaki uzaklıklara bakılır. Test verisi, eğitim aşamasında öğrenilen modellerden hangisine en yakınsa, ilgili sınıfa atanır. Doğrusal konveks modellerin uygun olmadığı durumlarda ise kernel hilesi kullanılmakta ve bu sayede doğrusal olmayan imge manifoldlarının doğru bir şekilde modellenmesi sağlanmaktadır.

Bir bireye ait yüz imgesinin öznitelik vektör gösterimi $\mathbf{x}_{ci} \in \mathcal{R}^d$ biçiminde olsun. Burada $c = 1, \dots, C$ sınıf numarasını; $i = 1, \dots, n_c$ ise c 'inci sınıfta bulunduğu varsayılan toplam n_c adet imge örneğini belirten örnek numarasını temsil eden indis, d ise imge vektörü uzayının boyutunu ifade eden değişkendir. Yöntem, eğitim verisi olarak ayrılan örnekleri kullanarak bir geometrik belirlemeyi amaçlar. Geometrik modeller basit afin veya konveks zarf modelleri olarak seçilmektedir. Herhangi bir sınıfı temsil edecek olan afin (affine) model, Eşitlik 3'de verildiği üzere, veri örneklerini içerecek olan en küçük alt uzay biçiminde tanımlanmaktadır.

$$H_c^{afin} = \left\{ \mathbf{x} = \sum_{i=1}^{n_c} \alpha_{ci} \mathbf{x}_{ci}; \left| \sum_{i=1}^{n_c} \alpha_{ci} = 1 \right. \right\}, \forall c \quad (3)$$

Bu tanımın parametrik karşılığı Eşitlik 4'de verilmiştir. Burada $\boldsymbol{\mu}_c \in \mathcal{R}^d$: ilgili sınıf örneklerinin ortalaması ($\boldsymbol{\mu}_c = \frac{1}{n_c} \sum_{i=1}^{n_c} \mathbf{x}_{ci}$),

$\mathbf{U}_c \in \mathcal{R}^{d \times l}$: afin uzayı geren birimlik vektörlerden seçilen ilk l ($l \ll d$) adet taban vektörlerinin oluşturduğu birimlik taban, $\mathbf{v}_c \in \mathcal{R}^l$: örneklerin \mathbf{U}_c dönüşümü üzerinden indirgenmiş koordinatlardaki karşılıklarını veren parametre vektörüdür. \mathbf{U}_c dönüşüm matrisi, sıfır ortalamalı veri örnekleri ($\{\mathbf{x}_{c1} - \boldsymbol{\mu}_c; \mathbf{x}_{c2} - \boldsymbol{\mu}_c; \dots; \mathbf{x}_{cn_c} - \boldsymbol{\mu}_c\}$) üzerinde tekil değer ayrıştırması yapılarak bulunur. Tekil değer ayrıştırması sonucunda bulunan tüm özvektörler yerine, indirgenmiş boyutlar elde edebilmek için özdeğerleri büyükten küçüğe doğru sıralandığında ilk l adet etkili özdeğere karşılık gelen özvektörler kullanılır. Burada, sıfıra karşılık gelen özvektörler, sıfır uzayını girdiği için kullanılmaz. Özdeğerleri sıfıra yakın olan birçok vektör de parazit, gürültü gibi gereksiz bilgileri temsil etmekte olduğu için kullanılmaz. Kullanılan özvektör sayısı l , veri uzay boyutunun yanında oldukça küçük bir değerdir.

$$H_c^{afin} = \{ \mathbf{x} = \boldsymbol{\mu}_c + \mathbf{U}_c \mathbf{v}_c \}, \forall c \quad (4)$$

Konveks zarf modelleri ise, veri örneklerinin afin uzaylar kadar geniş olmayan, veri örneklerini içine alan en küçük konveks bölge modellerini belirleme amacı güder. Herhangi bir sınıfı temsil edecek olan konveks model, Eşitlik 5'de tanımlanmıştır. Afin zarf modelleriyle karşılaştırıldığında en önemli farklılığın, veri örneklerinin önünde verilen parametrelerdeki kısıtlamadır. Afin modelde, bu çarpanlar, toplamları 1 olacak şekilde herhangi bir değerde seçilebilir ($-\infty < \alpha_{ci} < \infty$). Konveks modelde ise çarpanların pozitif olma zorunluluğu vardır ($0 \leq \alpha_{ci}$).

$$H_c^{konveks} = \left\{ \mathbf{x} = \sum_{i=1}^{n_c} \alpha_{ci} \mathbf{x}_{ci}; \sum_{i=1}^{n_c} \alpha_{ci} = 1, 0 \leq \alpha_{ci} \right\}, \forall c \quad (5)$$

Konveks zarf modellerinin parametrik ifadesi basitçe, eşitlik 6'da verildiği biçimde gösterilebilir. Burada $\mathbf{X}_c \in \mathbb{R}^{d \times n_c}$ matrisi, sütunları c 'nci sınıfın veri örneklerini içeren veri matrisi, $\alpha_c \in \mathbb{R}^{n_c}$ ise Eşitlik 5'de verilen kısıt altında hesaplanan katsayılardan oluşturulan katsayı vektörüdür. Farklı iki sınıfa ait olan konveks modeller H_i ve H_j olarak verilirse, bu modellere karşılık gelen katsayılar Eşitlik 7'de verilen optimizasyon problemi çözdürülerek hesaplanır.

$$H_c^{konveks} = \{ \mathbf{x} = \mathbf{X}_c \alpha_c \} \quad (6)$$

$$(\alpha_i^*, \alpha_j^*) = \arg \min_{\alpha_i, \alpha_j} \left\{ \left\| \mathbf{X}_i \alpha_i - \mathbf{X}_j \alpha_j \right\|^2; \sum_{k=1}^{n_i} \alpha_{ik} = 1, 0 \leq \alpha_{ik} < \infty; \sum_{k=1}^{n_j} \alpha_{jk} = 1, 0 \leq \alpha_{jk} < \infty \right\} \quad (7)$$

Bu problem, klasik destek vektör makineleri optimizasyonuna oldukça benzemektedir. Bu yüzden, ayrıntıları (Cevikalp & Triggs, 2010) kaynakçasında belirtildiği üzere, bir destek vektör makineleri eğiticisi kullanılarak problem çözdürülebilir.

Afin veya konveks yapılar, eğitim verisi kullanılarak, her bir sınıf için yukarıda belirtilen yöntemlerle belirlendikten sonra bu modeller, ilgili sınıfın imge kümelerini temsil eden matematiksel modeller olarak kullanılır. Test aşamasında, hangi sınıfa ait olduğu bilinmeyen bir imge kümesinin modeli, eğitim aşamasında belirlenen modellere olan uzaklığı cinsinden karşılaştırılır ve uzaklığı en küçük olan eğitim modelinin sınıfına atanır.

3.3. Uygulama

Bu çalışmada, tasarlanan yüz hizalama sürecinin, küme tabanlı yüz tanıma yöntemlerinin verimliliği üzerine etkileri test edilmiştir. Küme tabanlı tanıma yöntemi olarak, güncel birçok yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemler, Mutual Supspace Metodu (MSM) (Yamaguchi et al., 1998), Afin Zarf Modelleme (AZM) yönteminin doğrusal ve kernel modelleri (Cevikalp & Triggs, 2010), Konveks Zarf Modelleme (KZM) yönteminin doğrusal ve kernel modelleri (Cevikalp & Triggs, 2010), Regularized Nearest Points (RNP) (Yang et al., 2013), Sparse Approximation Nearest Points (SANP) (Hu et al., 2012), Manifold-to-Manifold distance (MMD) (Wang et al., 2012) yöntemleridir. Literatürde, yöntemlerin başarımları test edilirken imge kümeleri çoğunlukla elle kesilmiş olan yüz imgeleri kullanılarak veya doğrudan yüz sezicinin döndürdüğü çıktılar kullanılarak gerçekleştirilmiştir (yüz hizalama yapılmamıştır). Bu çalışmada, önerilen yöntem kullanılarak yüz hizalama yapıldıktan sonra imge kümeleri oluşturulmuştur. Önerilen yöntemin olumlu etkileri olup olmadığı, elle kesilen yüz imgeleri ile oluşturulan imge kümelerinin tanıma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

İmge kümeleri oluşturma süreci her iki durum için de benzer süreçlerle işletilmiştir. Birinci durumda, Şekil 5'de örnekleri gösterilen veritabanı imgelerinde yüz bölgeleri bir uzman tarafından elle işaretlenerek kesilmiş, kesilen bölge 8-bit gri seviye imgeye dönüştürülmüş, aydınlatma şiddeti farklılıklarının etkisi ortadan kaldırılmak üzere histogram eşitleme yapılmış ve son olarak, tanıma yöntemleri çalıştırılırken herhangi bir hafıza sorunu yaşanmaması için 40×30 gri seviye imgeleri olarak ölçeklenmiştir. İkinci durumda, veritabanı üzerinde önerilen yöntem Şekil 1'de verilen basamaklar üzerinden uygulanarak pozlama durumuna göre uygun şablona haritalanarak hizalanmış yüz imgeleri oluşturulmuştur. Daha sonra hizalanmış yüz imgesi, birinci durumda kullanılan aynı strateji üzerinden 8-bit gri seviye imgeye dönüştürülmüş, aydınlatma şiddeti farklılıklarının etkisi ortadan kaldırılmak üzere histogram eşitleme yapılmış ve son olarak 40×30 boyutlarına ölçeklenmiştir. Veritabanındaki her bir video için bu süreç işletilmiş ve ilgili video çerçevelerinden elde edilen 40×30 gri seviye imgeleri topluluğu, o videonun imge kümesini oluşturmuştur.

3.4. Bulgular ve tartışma

Küme tabanlı yüz tanıma deneylerinde, ESOGU-285 veritabanı için (Yalcin et al., 2015) kaynakçasında önerilen test yapısı kullanılmıştır. Buna göre, veritabanının birinci oturumunda çekilen 4 video eğitim kümeleri olarak, ikinci oturumda çekilen 4 video ise test kümeleri olarak kullanılmıştır. Eğitim aşamasında, eğitim için ayrılan kümelere sınıf modelleri öğrenilmekte, test aşamasında ise test modeli ile eğitimde öğrenilmiş olan küme modelleri arasındaki uzaklıklara bakılmaktadır. Test kümesi ataması ise minimum uzaklık prensibine göre yapılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan küme tabanlı yöntemler, farklı teoriler kullanarak modelleme yapmakta ve bu yüzden modeller arası uzaklık hesaplamasını farklı biçimlerde gerçekleştirmektedir. İmge kümeleri oluşturulurken hizalama yapılmayan birinci durumdaki tanıma oranları ve önerilen yöntemle hizalama yapılarak oluşturulduğu ikinci durum yüz tanıma başarımları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. ESOGU-285 video yüz veritabanı üzerindeki küme tabanlı yüz tanıma oranları

Yöntem	Hizalanasız durum	Hizalamalı durum
	Doğru tanıma oranı (%)	Doğru tanıma oranı (%)
1. MSM	50,1	54,8
2. AZM	44,3	50,2
3. KZM	55,1	58,9
4. RNP	46,7	50,1
5. SANP	51,9	55,8
6. MMD	52,0	56,0
7. Kernel AZM	62,1	66,9
8. Kernel KZM	62,1	66,8

Tablonun birinci satırındaki sonuçlar, yüz tanıma literatüründe birçok araştırmacının imge kümelerini oluştururken, yüz sezicisinin döndürdüğü veya elle kesilen yüz bölgeleri kullanılarak (hizalama yapılmadan) elde edilen tanıma oranlarını, ikinci satırdaki sonuçlar ise önerilen yöntem ile hizalanmış imgeler kullanıldığında elde edilen tanıma oranlarını yüzde cinsinden göstermektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, önerilen hizalama yöntemi uygulandığında tüm tanıma yöntemlerinin tanıma oranlarında iyileşmeler gözlenmiştir. Bu iyileşmeler, en az % 3,4 oranla RNP yönteminde; en çok % 5,9 oranla AZM yönteminde olmuştur. Bu çalışmada kullanılan sekiz yöntemin tanıma oranları, önerilen hizalama yöntemi ile hizalanan imge kümeleri ile karşılaştırıldığında, ortalama % 4,4 oranında artmıştır. Sonuç olarak, hizalanmış yüz imgeleri ile hizalanmamış yüz imgeleri, çeşitli imge kümeleri tabanlı yüz tanıma yöntemleriyle test edildiğinde, uygulanan görsel normalizasyon sürecinin tanıma yöntemlerinin başarımını iyileştirdiği gözlenmiştir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, yüz tanıma uygulamalarında kullanılmak üzere bir otomatik yüz hizalama yöntemi önerilmiştir. Yüz hizalama aşaması kolay bir süreç olmaması sebebiyle araştırmacılar tarafından şablon eşleştirmeye dayanan yüz tanıma yöntemleri dışında çoğunlukla uygulanmamaktadır çünkü birçok tanıma yöntemi için hizalama gerekli değildir. Özellikle video karelerinden yakalanan yüz imgeleri ile yüz tanıma uygulamalarında, her bir video karesi için yüz sezicinin döndürdüğü yüz bölgeleri herhangi bir hizalama yapılmadan kullanılmaktadır (Hu et al., 2012; Wang et al., 2012; Yang et al., 2013). Önerilen hizalama yönteminin kullanılması, veri üzerinde bir çeşit görsel normalizasyon işlemi uygulanması anlamına gelmektedir. Hizalama sayesinde, video imgelerinde benzer yüz pozlarının aynı şablona haritalanması, veri örneklerinin sınıf içi benzerliklerini arttırmaktadır. Sınıf içi benzerliklerin artmasının tanıma oranlarında iyileştirmeler vermesi beklenmektedir. Yapılan yüz tanıma deneylerinde, hizalanmış ve hizalanmamış yüz imgeleri, literatürde yaygın olarak bilinen çeşitli küme tabanlı tanıma yöntemlerinde kullanılmıştır. Deney sonuçlarında, hizalanmış yüz imgeleri kullanıldığında daha başarılı tanıma oranları elde edildiği gözlenmiştir. Önerilen yöntemle hizalama gerçekleştirildiğinde, hizalanmamış imgelere göre tanıma oranlarında ortalama %4,4 artış elde edilmiştir. Bu durum hizalama sürecinin tanıma oranları üzerinde olumlu bir etkisinin bulunduğunu göstermektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 114E014 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Referanslar

- Ahonen, T., Hadid, A., & Pietikainen, M. (2006). Face description with local binary patterns: Application to face recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28 (12), 2037-2041. doi: 10.1109/tpami.2006.244
- Cevikalp, H., & Triggs, B. (2010). Face recognition based on image sets. In *2010 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*. IEEE. doi: 10.1109/cvpr.2010.5539965
- Chelali, F., Djeradi, A., & Djeradi, R. (2009). Linear discriminant analysis for face recognition. In *2009 international conference on multimedia computing and systems*. IEEE. doi: 10.1109/mmcs.2009.5256630
- Gross, R., & Shi, J. (2001). *The cmu motion of body (mobo) database* (Tech. Rep. No. CMU-RI-TR-01-18). Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon University.
- Harandi, M. T., Sanderson, C., Shirazi, S., & Lovell, B. C. (2013). Kernel analysis on Grassmann manifolds for action recognition. *Pattern Recognition Letters*, 34 (15), 1906-1915. doi: 10.1016/j.patrec.2013.01.008

- Hassaballah, M., & Aly, S. (2015). Face recognition: challenges, achievements and future directions. *IET Computer Vision*, 9 (4), 614-626. doi: 10.1049/iet-cvi.2014.0084
- Hu, Y., Mian, A. S., & Owens, R. (2012). Face recognition using sparse approximated nearest points between image sets. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 34 (10), 1992-2004. doi: 10.1109/TPAMI.2011.283
- Intraface. (2018, oct). *Intraface software, the human sensing laboratory of carnegie mellon university*. Retrieved from <http://www.humansensing.cs.cmu.edu/software>
- Kim, M., Kumar, S., Pavlovic, V., & Rowley, H. (2008). Face tracking and recognition with visual constraints in real-world videos. In *2008 IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. IEEE. doi: 10.1109/cvpr.2008.4587572
- Lee, K.-C., Ho, J., Yang, M.-H., & Kriegman, D. (2005). Visual tracking and recognition using probabilistic appearance manifolds. *Computer Vision and Image Understanding*, 99 (3), 303-331. doi: 10.1016/j.cviu.2005.02.002
- Li, S. Z., & Jain, A. K. (Eds.). (2011). *Handbook of face recognition*. Springer London.
- Li, Z., Lin, D., & Tang, X. (2009). Nonparametric discriminant analysis for face recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31 (4), 755-761. doi: 10.1109/tpami.2008.174
- Lienhart, R., & Maydt, J. (2002). An extended set of haar-like features for rapid object detection. In *proceedings of international conference on image processing*. IEEE. doi: 10.1109/icip.2002.1038171
- Liu, C. (2004). Gabor-based kernel pca with fractional power polynomial models for face recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26 (5), 572-581. doi: 10.1109/tpami.2004.1273927
- Lu, J., Plataniotis, K., & Venetsanopoulos, A. (2003). Face recognition using kernel direct discriminant analysis algorithms. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 14 (1), 117-126. doi: 10.1109/tnn.2002.806629
- Lu, J., Wang, G., & Zhou, J. (2017). Simultaneous feature and dictionary learning for image set based face recognition. *IEEE Transactions on Image Processing*, 26 (8), 4042-4054. doi: 10.1109/tip.2017.2713940
- Mika, S., Ratsch, G., Weston, J., Scholkopf, B., & Mullers, K. (1999). Fisher discriminant analysis with kernels. In *Neural networks for signal processing IX: Proceedings of the 1999 IEEE signal processing society workshop (cat. no.98th8468)*. IEEE. doi: 10.1109/nnsf.1999.788121
- Nhat, V. D. M., & Lee, S. (2007). Kernel-based 2dpc for face recognition. In *2007 IEEE international symposium on signal processing and information technology*. IEEE. doi: 10.1109/isspit.2007.4458104
- Sakarya, Z. (2013). Karakalem Yüz Çizme - Charcoal Face Drawing [blog post]. Retrieved from <http://karakalem-portre-photoshop.blogspot.com/2013/10/karakalem-yuz-cizme-charcoal-face.html>
- Scholkopf, B., Smola, A., & Muller, K.-R. (1997). Kernel principal component analysis. In *Lecture notes in computer science* (pp. 583-588). Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/bfb0020217
- Shi, B., Bai, X., Liu, W., & Wang, J. (2018). Face alignment with deep regression. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 29 (1), 183-194. doi: 10.1109/tnnls.2016.2618340
- Tistarelli, M., & Champod, C. (Eds.). (2017). *Handbook of biometrics for forensic science*. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-50673-9
- Turk, M., & Pentland, A. (1991). Eigenfaces for recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 3 (1), 71-86. doi: 10.1162/jocn.1991.3.1.71
- Vinay, A., Shekhar, V., Murthy, K. B., & Natarajan, S. (2015). Face recognition using gabor wavelet features with PCA and KPCA - a comparative study. *Procedia Computer Science*, 57 , 650-659. doi: 10.1016/j.procs.2015.07.434
- Viola, P., & Jones, M. (2001). Robust real-time object detection. *International Journal of Computer Vision*, 57, 137-154. doi: 10.1023/B:VISI.0000013087.49260.fb
- Wang, H., Wang, Y., & Cao, Y. (2009). Video-based face recognition: A survey. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2 , 136-139. doi: 10.1007/978-1-84882-385-3_8
- Wang, R., Shan, S., Chen, X., Dai, Q., & Gao, W. (2012). Manifold-manifold distance and its application to face recognition with image sets. *IEEE Transactions on Image Processing*, 21 (10), 4466-4479. doi: 10.1109/tip.2012.2206039

- Wiskott, L., Fellous, J.-M., Kruger, N., & von der Malsburg, C. (1997). Face recognition by elastic bunch graph matching. In *Computer analysis of images and patterns* (pp. 456-463). Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/3-540-63460-6_150
- Wu, Y., & Ji, Q. (2018). Facial landmark detection: A literature survey. *International Journal of Computer Vision*. doi: 10.1007/s11263-018-1097-z
- Xiong, X., & De La Torre, F. (2013). Supervised descent method and its applications to face alignment. In *Proceedings of the IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 532-539). doi: 10.1109/CVPR.2013.75
- Yalcin, M., Cevikalp, H., & Yavuz, H. S. (2015). Towards large-scale face recognition based on videos. In *2015 IEEE international conference on computer vision workshop (ICCVW)*. IEEE. doi: 10.1109/iccvw.2015.141
- Yamaguchi, O., Fukui, E., & Maeda, K. (1998). Face recognition using temporal image sequence. In *proceedings third IEEE international conference on automatic face and gesture recognition*. IEEE. doi: 10.1109/afgr.1998.670968
- Yang, M., Wang, X., Liu, W., & Shen, L. (2017). Joint regularized nearest points for image set based face recognition. *Image and Vision Computing*, 58, 47-60. doi: 10.1016/j.imavis.2016.07.008
- Yang, M., Zhu, P., Gool, L. V., & Zhang, L. (2013). Face recognition based on regularized nearest points between image sets. In *2013 10th IEEE international conference and workshops on automatic face and gesture recognition (FG)*. IEEE. doi: 10.1109/fg.2013.6553727
- Yang, M. H., Kriegman, D. J., & Ahuja, N. (2002). Detecting faces in images: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24 (1), 34-58. doi: 10.1109/34.982883
- Yavuz, H. S., Cevikalp, H., & Edizkan, R. (2013). Automatic face recognition from frontal images. In *2013 21st signal processing and communications applications conference (SIU)*. IEEE. doi: 10.1109/SIU.2013.6531215
- Zhao, J., Han, J., & Shao, L. (2018). Unconstrained face recognition using a set-to-set distance measure on deep learned features. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 28 (10), 2679-2689. doi: 10.1109/tcsvt.2017.2710120
- Zhou, E., Fan, H., Cao, Z., Jiang, Y., & Yin, Q. (2013). Extensive facial landmark localization with coarse-to-fine convolutional network cascade. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision* (pp. 386-391). doi: 10.1109/ICCVW.2013.58
- Zhu, X., & Ramanan, D. (2012). Face detection, pose estimation, and landmark localization in the wild. In *Proceedings of the IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 2879-2886). doi: 10.1109/CVPR.2012.6248014



Seramik Sağlık Gereçleri Ürünlerinde Piroplastik Deformasyonun Azaltılmasına Bağlı Olarak Geliştirilen Kompozisyonların Üretim Maliyeti Açısından Değerlendirilmesi

Evaluation of Production Costs Based on Reduction of Pyroplastic Deformation in Ceramic Sanitaryware Products

Nazım Kunduracı¹  Baran Tarhan² , Cahide Sarısakal¹ 

¹ Bülent Ecevit Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 67000, Zonguldak, TÜRKİYE

² Uşak Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Seramik Bölümü, 64000, Uşak, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 14/12/2018

Kabul/Accepted: 11/04/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Seramik Sağlık Gereçleri (SSG); metalik olmayan ve inorganik hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılarak akışkan bir çamur haline getirilmesi, daha sonra da bu karışımın alçı veya sentetik reçine kalıplarda şekillendirilerek 1200-1250 °C aralığında pişirilmesi ile elde edilen ve su emme değeri % 0,5'in altında olan ürünlerdir. Kil, kaolen, kuvars, feldispat gibi inorganik hammaddeler temel yapıyı oluşturur. Beyaz veya renkli lavabo, ayak, klozet, rezervuar, bide, hela taşı, pisuar ve duş teknesi ürün yelpazesinin başlıca ürünleridir.

Bu çalışmada, K₂O/Na₂O oranı artırılarak SSG'nin piroplastik deformasyonun düşürülmesi amaçlanmıştır. Potasyum-feldispat oranı artırılarak yüksek sıcaklıkta bünye viskozitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. XRD, su emme, mukavemet, pişme küçülmesi ve deformasyon analizleri yapılmıştır. Artan K-feldispat miktarına bağlı olarak, yüksek sıcaklıkta bünye viskozitesi yükselmekte ve deformasyona karşı direnç artmaktadır. Sisteme K-feldispat ilavesinin, camsı fazda çözünen SiO₂ miktarını artırarak bünye viskozitesini yükselttiği gözlenmiştir. Bünyede K-feldispat miktarı artırılıp sinterleme sıcaklığı düşürülmüş; buna bağlı olarak bünyenin deformasyon direnci artmıştır. Bu değişikliklerin üretim maliyeti üzerine etkisi değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Seramik sağlık gereçleri, piroplastik deformasyon, K-feldispat”

Abstract

Ceramic Sanitarywares (CSW); are the products produced by mixing inorganic and non-metallic raw materials at a certain ratio into a fluid mud, then this mud is shaped in gypsum or synthetic resin molds, fired at 1200-1250 °C range and their water absorption value is less than 0.5 %. Inorganic raw materials such as clay, kaolin, quartz and feldspar form the basic structure. White or colored washbasin, foot, closet, reservoir, bide, stones, urinal and shower stall are the main products of wide product range.

In this study, it is aimed to decrease CSW's pyroplastic deformation by increasing K₂O/Na₂O ratio. The effect on high temperature body viscosity was investigated by increasing the K-feldspar ratio. XRD, water absorption, strength, shrinkage and deformation analyzes were performed. Depending on the amount of increased potassium-feldspar, the high temperature body viscosity increases and the resistance to deformation increases. It was observed that the addition of K-feldspar to the system increased the viscosity of the body by increasing the amount of (SiO₂) dissolved in the glassy phase.

Key Words

“Ceramic sanitaryware, pyroplastic deformation, K-feldspar”

1. Giriş

Seramik sağlık gereçleri Türkiye’de gelişen inşaat sektörüne bağlı olarak giderek önem kazanmaktadır. Sağlık gereçlerinin başlıca ürünleri; lavabo ve ayakları, klozet, küvet, rezervuarlar ve pisuarlardır. Yaşam alanları içerisinde nem oranı yüksek banyo ve tuvaletlerde kullanılan sağlık gereçlerinin atıklarla sürekli temas halinde olması nedeniyle hijyenik ve insan ağırlığına maruz kaldığı için mukavemetli olması istenir. Seramik sağlık gereçlerinde “vitreous china” (VC) ve “fine fire clay” (FFC) olmak üzere iki tür çamur kullanılmaktadır. FFC çamuru büyük ebatlı ürünlerin üretiminde kullanılırken, VC çamuru daha küçük lavabo, klozet gibi diğer seramik sağlık gereçlerinin üretiminde kullanılmaktadır. Seramik sağlık gereçlerinin üretiminde VC çamuru daha düşük su emme ve porozite (gözenek) değerlerine sahip olduğu için hijyen ve mukavemet açısından daha çok tercih edilmektedir (Seramik Sağlık Gereçleri Sektörü Dokuzuncu Kalkınma Planı, 2007-2013).

Seramik sağlık gereçleri fonksiyonel kullanımlarının yanı sıra bir tür ev dekorasyon malzemesi haline gelmiştir. Son yıllarda evlerin bir uzantısı olan banyolarda daha fazla vakit geçirilmekte olup özel tasarım ürünlerine talep giderek artmaktadır. Genellikle büyük boyutlu, düz ve keskin hatlı ürünler tercih edilmektedir. Ancak pioplastik deformasyon bu ürünlerde daha çok görülmektedir. Pişirim sırasında büyük ve köşeli ürünler dik olarak fırına konulduklarından kendi ağırlıkları altında pioplastik deformasyona uğramaktadırlar. Pioplastik deformasyon bu ürünlerde problem yarattığından dolayı VC çamuru yerine farklı olarak FFC çamuru kullanılmaktadır. FFC çamuruyla hazırlanan ürünler su emme değerlerinin yüksek olması ve poroziteli oluşları nedeniyle uzun ömürlü olmamaktadır. Kullanıcı açısından olduğu gibi üretici açısından da olumsuz yönleri bulunmaktadır. VC çamurundan farklı olarak FFC çamurunun hazırlama aşaması ve kullanılan hammaddelerin farklı olması nedeniyle yeni bir üretim hattı gerektirmektedir. Bu da üretici için ek tesis kurulumu ve işçilik maliyeti demektir. FFC çamuru VC çamurundan % 30 daha maliyetlidir (Tunçel, 2012). FFC çamurunun su emme değerleri fazla olduğu için hijyenik olmamakla birlikte klozet üretiminde kullanılmamaktadır. Ancak düşük deformasyonla üretimi sebebiyle büyük ve düz ebatlı ürünlerde kullanılması kaçınılmazdır.

Pioplastik deformasyon, yüksek sıcaklıkta pişirim sırasında camsı faz içeriğinin fazla olması nedeniyle çamurun kendi ağırlığına dayanamayarak şekil bozukluğuna uğramasıdır. “Vitreous China” (VC) camsı faz içeriği yüksek olduğundan dolayı pioplastik deformasyona daha çok uğramaktadır. Bu durum et kalınlığı yüksek, büyük ebatlı ve karmaşık şekilli ürünlerde sorunlara yol açmaktadır (Miura vd., 1999). Fireclay bünyelerinde duvar karosu atığı çalışmaları yapılmış ve duvar karosu kırıklarının fireclay bünyelerinde kullanılabileceği belirlenmiştir (Tarhan, 2019). İssi vd. (2017) yaptıkları çalışmada farklı tane boyutuna sahip bünye kompozisyonlarının fireclay döküm ve sinterlenmesi üzerine etkisini incelemişlerdir. Tarhan vd.’nin (2016) yaptığı çalışmada fireclay atıklarının duvar karosu üzerine etkisi, Tarhan vd.’nin (2017) yaptığı çalışmada ise seramik sağlık gereçleri atıklarının porselen karo bünyeleri üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Na-Feldispat ve K feldispat ile yapılan çalışmalarda ayrı ayrı kullanıldıklarında Na feldispat pişirim sıcaklığını su emme değerini K-Feldispat’a göre daha çok düşürdüğü belirlenmiştir (Swapan Kr Das. vd, 2003). Bu çalışmada, Na-feldispat ve K-feldispat oranlarında değişiklik yapılarak pioplastik deformasyona etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda feldispat tipinin sağlık gereçlerinde pioplastik deformasyonu nasıl etkilediğine yönelik detaylı çalışmalar bulunmamaktadır. Bu nedenle, çalışmada sağlık gereçlerinde feldispat türünün ve reçete oranlarının pioplastik deformasyona ve üretim maliyeti üzerine olan etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Seramik sağlık gereçlerinin reçetelerinde önce özlü hammaddeler (kil-kaolen grubu) 30 dakika karıştırıldıktan sonra özsüz hammaddeler (kuvars, feldispat grubu) ilave edilerek 2 saat boyunca mikserde karışarak homojen bir çamur elde edilmiştir. Homojen çamurun döküm işlemi öncesinde reolojik özellikleri kontrol edilerek yoğunluğu 1795-1800 g/cm³ aralığında olacak biçimde ayarlanmıştır. Çamur viskozitesi Gallenkamp viskozimetresi ile ölçülmüştür. V0: 320-330° V1: 300-295° ve V6:245-250° değerleri aralığında, çamur sıcaklığı da 25 °C olacak biçimde ayarlanmıştır. Çamurlar 24 saat dinlendikten sonra alçı kalıplara döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Hammaddelerin ve reçetelerin kimyasal analizleri X-ışını floresans spektrometresi (PanalyticalAxios XRF, Kaleseramik Ar-Ge Merkezi, Türkiye) kullanılarak belirlenmiştir. Reçete kimyasal analiz sonuçları ve rasyonel hesaplamaları sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir.

Numunelerin fiziksel özellikleri TS EN 997 standardı göz önüne alınarak ölçülmüş ve değerlendirilmiştir. Test sonuçları 5 ölçümün ortalama değerleri alınarak yapılmış ve standart sapma % ± 1,5 olacak şekilde değerlendirilmiştir. Eğilme Mukavemeti 3 noktalı eğme testi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin su emme değerleri TS EN 997 standardına göre yapılmıştır (Denklem 1).

$$Su\ emme\ \% = \frac{w_w - w_d}{w_d} \times 100 \quad (1)$$

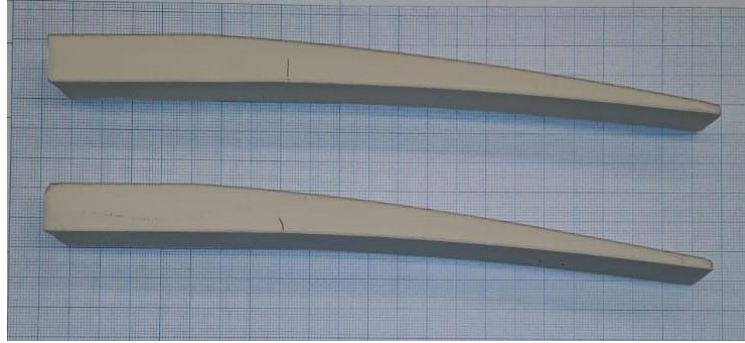
w_w : numunenin yaş ağırlığı, w_d : numunenin kuru ağırlığı.

Deformasyon miktarının belirlenebilmesi için numuneler, uç kısmı serbest salınım yapmakta olan özel şekilli alçı kalıplarda şekillendirilmiştir. Pişirim öncesinde numunenin baş kısmı ile uç kısmının yükseklikleri eşittir. Pişirim sonrasında Şekil 1’de gösterilen forma ulaşan numunenin baş ve uç kısımları arasındaki yükseklik farkı milimetrik kâğıt yardımıyla ölçülerek ne kadar deforme olduğu milimetre olarak ölçülmüştür. Numuneler kurutulmuş ve Kaleseramik Çanak Kalebodur Seramik San. A.Ş.

seramik sağlık gereçleri fabrikasında 1200°C ve 1232°C tepe sıcaklığına çıkılarak 16 saatte sinterlenmiştir. Fırından gelen numunelerin boyları kumpas ile ölçülür ve küçülme oranı hesaplanır. % küçülme hesaplaması şu şekilde şekildedir;

$$\% \text{ küçülme} = ((\text{ilk çap} - \text{son çap}) / \text{ilk çap}) * 100 \quad (2)$$

X-ışınları difraktometresi (XRD-X'pert Pro MPD, Kaleseramik Ar-Ge Merkezi, Türkiye) kullanılarak pişmiş bünyelerin faz analizi yapılmıştır. XRD analizleri $\text{CuK}\alpha$, 40 kV ve 30 mA şartlarında 10°-70° aralığında, tarama hızı 2°/dak. olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Deformasyon ölçümü yapılmış numune örnekleri.

Tablo 1. Reçete kimyasal analiz sonuçları (Ağırlıkça %)

Ağırlıkça(%)	K. K.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Diğerleri (Fe ₂ O ₃ , TiO ₂ , SO ₃)
Referans Reçete	5,69	67,39	20,98	2,70	1,14	0,38	0,28	1,44
D1	5,69	65,93	20,65	2,53	1,13	0,36	0,27	3,44
D2	5,71	67,21	20,98	2,43	1,61	0,35	0,27	1,44
D3	5,72	67,12	20,98	2,29	1,85	0,33	0,27	1,44
D4	5,73	67,03	20,98	2,16	2,08	0,32	0,27	1,43

K. K.: Kızdırma Kaybı

5 farklı reçetede Na-feldispat azaltılarak yerine farklı oranlarda K-feldispat kullanılmıştır. Sistemati olarak K₂O/Na₂O oranı arttırılmıştır. Rasyonel değerleri açısından oran değişikliğinin bünye özellikleri üzerine olan etkisinin incelenmesi için kaolen ve kuvars rasyonel oranları sabit tutulmuştur. Referans reçete, D1, D2, D3 ve D4 için rasyonel analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. K₂O/Na₂O oranı referans reçete için 0,42, D1 için 0,45, D2 için 0,66, D3 için 0,81 ve D4 için 0,96'dır.

Tablo 2. Reçetelerin rasyonel analiz sonuçları

	K-feldispat	Na-feldispat	Kaolen	Kuvars
Referans Reçete	6,91	23,38	39,64	30,07
D1	7,01	22,34	40,36	30,29
D2	9,76	21,03	39,48	29,73
D3	11,18	19,86	39,40	29,56
D4	12,60	18,68	39,32	29,39

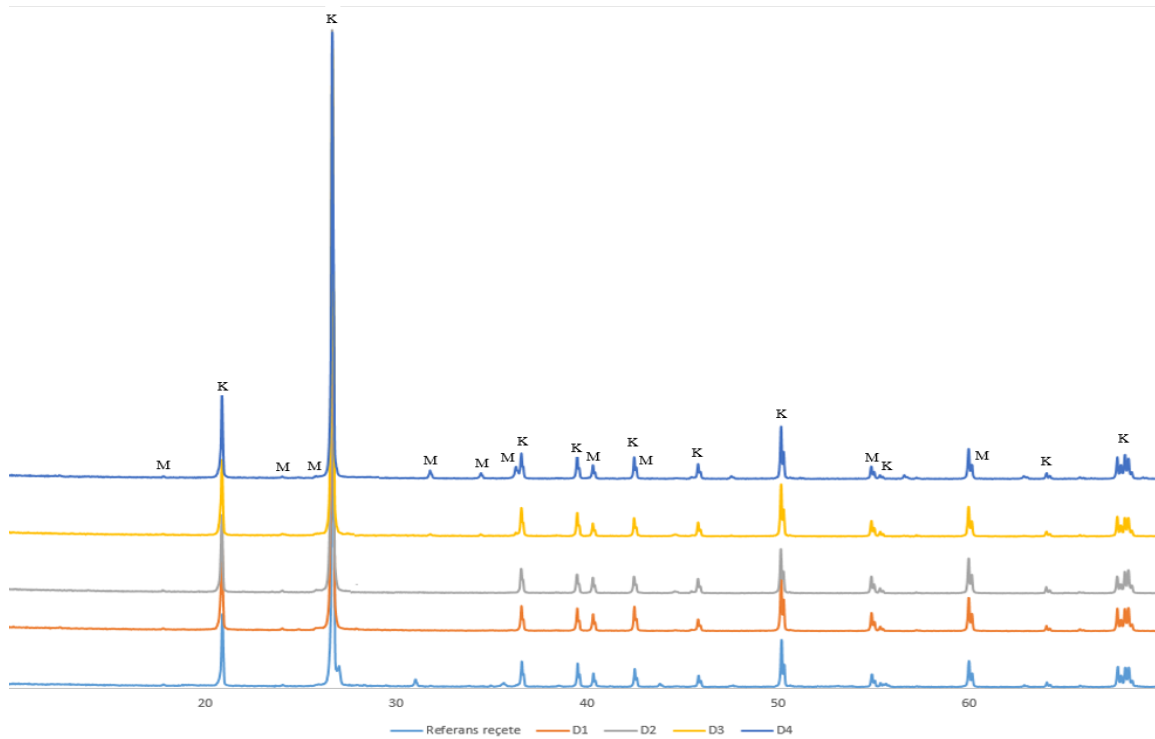
Hammaddelerin kimyasal analizleri X-ışını floresans spektrometresi (PanalyticalAxios XRF, Kaleseramik Ar-Ge Merkezi, Türkiye) kullanılarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Hammaddelerin kimyasal analiz sonuçları(Ağırlıkça %)

Hammadde	K.K	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Kil-1	10,09	57,55	27,12	1,44	0,94	0,13	0,30	0,23	2,06
Kil-2	9,37	60,64	24,88	1,24	1,45	0,25	0,43	0,01	1,80
Kil-3	9,44	56,32	27,32	1,41	2,05	0,31	0,63	0,09	2,27
Kaolen-1	11,73	48,51	35,67	0,06	0,90	0,04	0,33	0,02	2,60
Kaolen-2	12,38	50,56	34,56	0,39	0,91	0,13	0,15	0,07	0,57
Na-feldispat	0,10	73,04	16,46	0,33	0,06	0,90	0,19	8,63	0,30
Kuvars	0,14	98,63	0,91	0,03	0,01	0,01	0,03	0,24	0,12
K-feldispat	0,52	68,55	16,53	0,13	0,10	0,15	0,12	1,85	12,05

3. Sonuçlar ve Tartışma

Denemeler 1200 °C ve 1232 °C sıcaklıkta sinterlenmiştir. Şekil 2’de 1200 °C’de sinterlenen X-ışınları kırınım paternleri verilmiştir. Bütün bünyelerde ana faz olarak kuvars ve müllit belirlenmiştir.



Şekil 2. 1200 °C’de sinterlenen numunelere ait X- ışınları kırınım paternleri (Kuvars: K, Müllit: M).

XRD grafikleri incelendiğinde bünyedeki potasyum feldispat miktarı arttıkça yani K₂O/Na₂O miktarı arttıkça müllit pik şiddetlerinin arttığı dolayısıyla müllit faz oluşumunun da arttığı söylenebilir. Michel vd.’nin (1990) alümina-silika sistemlerini inceledikleri çalışmalarında, müllit fazının seramik bünyelerde mukavemet sağladığı belirtilmiştir. Schneider vd. (1993) seramik müllitler üzerine yaptıkları çalışmalarında, müllitin, düşük ısıl genleşme, yüksek ergime noktası, iyi sürünme dayanımı, düşük ısıl iletkenlik ve kimyasal kararlılık gibi özellikleri ile son yıllarda yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilen malzemeler arasına girdiğini belirtmiştir.

Yapılan çalışmalarda pişmiş mukavemet değerlerinin K-feldispat miktarının artışıyla orantılı şekilde arttığı Tablo 4 ve Tablo 5’teki pişme mukavemeti sonuçlarına bağlı olarak da yorumlanabilir. K-feldispat miktarının artmasıyla her iki sinterleme sıcaklığında da mukavemet artmıştır. Sıcaklık arttıkça piroplastik deformasyon artmıştır. Ancak, K-feldispat miktarı arttıkça

deformasyonda gözle görülür bir azalma gerçekleşmektedir. Bu bakımdan özellikle deformasyon kaynaklı kalite kayıpları azaltılarak verimlilik artırılabilir. Bu verimlilik artışı maliyetlerin düşmesine de sebep olacaktır. Düşük sıcaklıklarda su emme değeri yükselmekle birlikte deformasyon değeri de önemli ölçüde azalmaktadır (Tablo 5). Bu da ürün kalitesinin artışına bağlı sağlanan verimlilikle birlikte fırın sıcaklıklarının düşürülebileceği ve enerji verimliliğinin de artacağı anlamına gelmektedir.

Tablo 4. 1232 °C’de sinterlenen deneme reçetelerinin özelliklerinin referans reçete ile karşılaştırılması.

	Referans Reçete	D1	D2	D3	D4
Kuru Küçülme (%)	3,02	2,63	2,96	2,90	2,72
Kuru Mukavemet (kg/cm ²)	39,70	35,20	34,60	33,70	38,10
Pişme Küçülmesi (%)	10,30	10,45	11,00	11,38	11,51
Pişme Mukavemeti (kg/cm ²)	596,60	675,80	662,5	627,2	701,4
Deformasyon (mm)	30,50	30	31	29	29
Su Emme (%)	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02
Civa Yoğunluğu (g/cm ³)	2,355	2,347	2,358	2,364	2,367

1232 °C’de sinterlenen ürünlerde K₂O/Na₂O oranı kuru küçülme değeri standart değere göre daha düşüktür, fakat bu değerler işletme üretim standartları içindedir. Kuru mukavemet değerlerinde referans reçeteye yakın değerler elde edilmiştir. Pişme küçülmesi değeri ise standart reçete ile karşılaştırıldığında yükselmiştir. D4 reçetesindeki pişme küçülmesi değeri üretim sınırları dışındadır. Pişme küçülmesi, ürünün su emme değeri ile beraber değerlendirildiğinde ürün fazla sinterlenmiştir. Sıcaklığın düşürülerek çalışılması durumunda pişme küçülmesi değeri düşecektir. Pişme mukavemeti değerleri standart reçeteye göre yaklaşık 30-100 kg/cm² aralığında yükselmiştir. K₂O oranının artmasıyla deformasyon değeri azalmıştır. Sıcaklığın yüksek olması durumunda dahi deformasyonda düşüş belirlenmiştir. Bu düşüş camı fazın K₂O miktarının artmasıyla camı fazın viskozitesinin yükselmesi sebebiyle olduğu öngörülmektedir.

1200 °C’de sinterlenen ürünlerde K₂O/Na₂O oranı kuru küçülme değeri bir biri ile yakın değerlerdir. Kuru mukavemet değerinde artış belirlenmiştir. Bu sıcaklıktaki en belirgin fark pişme küçülme değerinin bütün reçetelerde benzer olmasına rağmen mukavemet değerinde, özellikle D4 reçetesinin mukavemet değerinde artış olmasıdır (Tablo 5). Tüm reçetelerin piropplastik deformasyon değerleri referans reçeteninkine yakın değerlerdedir. 1200 °C’de sinterlenen reçetelerin hepsi ISO ve işletme standartları içindedir. K₂O/Na₂O oranı arttıkça sinterlemenin daha düşük sıcaklıklarda yapılabileceği belirlenmiştir.

Tablo 5. 1200 °C’de sinterlenen deneme çamurlarının özelliklerinin referans çamur ile karşılaştırılması.

	Referans Reçete	D1	D2	D3	D4
Kuru Küçülme (%)	2,95	2,92	2,69	2,62	2,72
Kuru Mukavemet (kg/cm ²)	39,8	35,6	41,5	39,6	45,7
Pişme Küçülmesi (%)	10,64	10,59	10,39	10,56	10,29
Pişme Mukavemeti (kg/cm ²)	445,3	466,6	475,4	463,6	618,1
Deformasyon (mm)	25	27	25	26	23
Su Emme (%)	0,17	0,14	0,08	0,08	0,06
Civa Yoğunluğu (g/cm ³)	2,307	2,313	2,313	2,307	2,313

Tablo 6. Reçetelerin (TL/Ton) maliyetleri

	Referans Reçete*	D1	D2	D3	D4
Maliyet (TL/Ton)	X	X+5 TL	X+13 TL	X+20 TL	X+27 TL

*Referans reçete maliyeti "X" olarak belirtilmiştir.

Bartusch (2004) yaptığı çalışmada sağlık gereçleri üretiminde sinterleme sıcaklığında sağlanan 100 °C' lik bir düşüş ile % 30 enerji tasarrufu sağlanacağı kanıtlamıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda sinterleme sıcaklığını 30°C düşürülebileceği belirlenmiştir. İlgili çalışma baz alınacak olursa gerçekleştirilen çalışmada da ortalama % 10'luk bir enerji tasarrufu sağlanması hesap edilebilmektedir. Yapılan bu hesaplamada sadece fırın için gerekli enerji yer almaktadır.

Yani 16 saat gibi uzun bir süreci kapsayan sağlık gereci pişiriminde düşük sıcaklıklarda çalışmak enerjiden tasarruf sağlayacaktır. Fırın yapı malzemelerinin (fırın tuğlası, cam yünü gibi...) de ömrünün artacağı düşünüldüğünde sağlık gereçlerinde sinterleme sıcaklığında yapılacak her türlü sıcaklık düşürme çalışması oldukça önemli kazançlar sağlayacaktır. Dolayısıyla sağlık gereçleri üretim maliyetinde en büyük paya sahip olan enerji maliyetlerinin düşürülmesi hem sektöre hem de ülkeye büyük katma değeri sağlayacaktır.

Reçetelerde ekstradan K-feldispat kullanıldığı için hammadde maliyetleri artacaktır (Tablo 6). Ancak daha düşük sıcaklıklarda pişirim yapılabileceği için enerjiden tasarruf edilecektir. Aylık 80.000 ürün üreten bir firmanın verilerine göre; gerekli hesaplamalar yapıldığında ürün başına % 35-40 arasında üretim maliyetlerinde azalma söz konusudur. Dolayısıyla enerjiden daha fazla tasarruf edileceği için hammaddedeki fiyat artışının göz ardı edilebilir seviyede olacağı öngörülmektedir.

4. Sonuçlar

Deneysel çalışmalar sonucunda K₂O/Na₂O oranı arttıkça ürünlerin mukavemet değerlerinin artması sonucunda hızlı pişirim veya enerji tasarrufu sağlayabilen bünyelerin üretimlerinin olabileceği belirlenmiştir. Maliyet açısından incelendiğinde de hammadde maliyetlerinde artış olmasına karşılık enerji maliyetleri olan doğalgaz ve elektrik tüketimlerinde düşüşler firmalara kazanç getireceğini göstermektedir. Firmaların üretim miktarlarına bağlı olarak bu hesaplama değişkenlik gösterebileceğinden ötürü Türkiye Seramik Sağlık Gereçleri üreticilerinin üretimlerinin ortalaması alındığında ortalama ürün başına % 35-40 arasında maliyet avantajı getireceği öngörülmektedir.

Teşekkür

Kaleseramik Çanakkale Kalebodur Seramik San. A.Ş. Ar-Ge Merkezi'ne desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Referanslar

Bartusch, R., (2004), Energy saving potentials in the ceramic industry. *Interceram*, 53, 312-317.

İssi, A., Derin Coşkun, N., Tiryaki, V., & Uz, V. (2017)., Casting and sintering of a sanitaryware body containing fine fire clay (FFC). *J. Aust. Ceram. Soc.*, 53.

Michel, D., Mazerolles, L., & Portier, R., (1990), Directional solidification in the alumina-silica system: microstructure and interfaces. *Ceramic Transactions*, 6, 435-437.

Miura, M., Shimadzu, T., Shin, H., & Ishida, E. H., (1999), Evaluation of softening deformation behaviour in porcelain bodies during firing. *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 20(2), sayfalar.

Tarhan, M., Tarhan, B., & Aydın, T., (2016)., The effect of fine fire clay sanitaryware wastes on ceramic wall tiles. *Ceramics International*, 42(15), 17110-17115.

Tarhan, B., Tarhan, M., & Aydın, T., (2017), Reusing sanitaryware waste products in glazed porcelain tile production. *Ceramics International*, 43(3), 3107-3112.

Tarhan, B., (2019), Usage of fired wall tile wastes into fireclay sanitaryware products, *Journal of the Australian Ceramic Society*, <https://doi.org/10.1007/s41779-018-0285-1>

Tunçel, D. Y., (2012), Seramik sağlık gereçleri bünyelerinin piyoplastik deformasyonunun azaltılması, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.

Seramik Sağlık Gereçleri Sektörü Dokuzuncu Kalkınma Planı, 2007-2013. Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı

Schneider, H. Schmücker, M., İkeda, K., & Kaysser, W.A., (1993), Optically translucent mullite ceramics. Journal of American Ceramic Society, 76, 2912-2914.

Swapan Kr Das, Kaustic Dana.,(2003), Differences in densification behaviour of K- and Na-Feldspar containing porcelain Bodies, Thermocim Acta. 406, 199–206



Investigation of Sintering Behaviour of Bone China Bodies Produced by Bone China Wastes

Fazilet Güngör ^{*1}

¹Kütahya Porselen, R&D Center, Atatürk Bulv. 8. Km., Kütahya, TURKEY

Başvuru/Received: 08/11/2018

Kabul/Accepted: 14/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Abstract

Flawed and broken wastes obtained from the production of Bone China were used for formulating Bone China body recipe instead of albite, quartz and bone ash as the same chemical composition of original Bone China body. The amount of kaolin and clay were used as the same amount of the Bone China body due to obtain optimum plastic behaviour. This study was carried out in two steps. At the first step, compositions were fired at the original firing temperature of Bone China as 1250 °C and at the second step, compositions were fired at 1200 °C. Water absorption and pyroplastic deformation results of the bodies were measured. XRD and SEM determined the phase and microstructural evaluation of the bodies, respectively. As the amount of the Bone China waste increased amount of the glassy phase increased, anorthite and quartz were decreased. Technical properties of the bodies changed parallel to the microstructural changes. As the amount of bone waste increased in the compositions, optimum technical properties of the compositions were obtained at 1200 °C.

Key Words

“Bone China, Bone ash, Bone China waste, Microstructure, Sintering”

1. Introduction

As a ceramic material, Bone China is a highly specialized product and is the basis of the world's most attractive and expensive types of tablewares, mainly due to its translucency, whiteness, bright glaze, decoration quality and high strength (Kara & Stevens, 2002). It was first developed and commercially sold by Josiah Spode II in Stoke on Trent at 1794 A.D. (Rado, 1981).

Dodd (1964) has defined Bone China as a vitreous translucent pottery made from a body of the following approx. composition (Dodd, 1964),

Calcined Bone: 45-50 %

China Clay: :25-30 %

Cornish Stone : 25-30 %

The overall microstructure of Bone China lies in the eutectic region of 11% tricalcium phosphate, 38% silica and 51% anorthite with a melting temperature of 1290 \pm 5 °C. If the firing proceeds slowly at temperature just above 1250 °C, the deformation parts may occur. Therefore, the firing should be conducted in nonequilibrium conditions, forming the fired phases that are anorthite, β -Calcium tri phosphate and a siliceous glass (Carus et al., 2012, Iqbal et al, 2000; Douglas et al, 2015)

The main role of bone ash is to form crystalline phases and its main constituent is hydroxyapatite ($\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), which decomposes forming calcium oxide (CaO) and β -tricalcium-phosphate ($\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), according to the following reaction:



Lime released during the process rapidly reacts with dehydrated kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), forming anorthite ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) (Bragança & Bergman, 2008):



Bone ash or calcined bone in the manufacturing of Bone China, making Bone China generally more durable and translucent than kaolin based porcelain but one of the most expensive raw material for tableware industry (Douglas et al., 2015, Batista&Hand, 2001). Therefore it is the one of the important parameter for determining the cost of the Bone China ware. On the other hand, it is important to remark that calcination and cleaning of bones can cause some pollution; mainly regarding burning of combustible gases. Therefore, not only because of its high price but also because of its environmental effects, utilization of Bone China wastes is important for tableware industry.

Several authors have recently investigated the microstructural development of Bone China body (Kara, 2004; Kara & Stevens , 2002) but the effect of Bone China waste on the sintering behavior of Bone China body has not been studied. In this study, effect of Bone China wastes on the sintering behavior of Bone China production was investigated.

2. Experimental Procedure

Bone waste was washed with distilled water and grinded by jet mill (Ceramic instruments). The particle size of the grinded Bone China waste and the other unplastic raw materials (bone ash, quartz and albite) were measured by laser diffraction method using Malvern Master Sizer 200 G model and the results were given in Table 1. Chemical compositions of Bone China, bone ash, quartz, albite, kaolin and clay were given in Table 2. Bone China wastes were used in the Bone China recipe instead of albite, quartz and bone ash as BA05: 5%, BA10:10%, BA15:15% and BA20:20%. The recipes were designed to obtain the chemical analysis of the basic Bone China recipe without waste (BA00).

To prepare the batches, raw materials were dispersed in an aqueous slip containing 70 wt. percentage solid and 0.01 wt. percentage dispersant (Na-silicate). After then, mixed for 1 h using IKA RW 20 digital mixer. The slurries were screened with 60 mesh (250 μm) sieves. Slips were poured into the bar shaped plaster moulds for pyroplastic deformation measurement. Samples were fired at the firing cycles as given in Fig. 1. Dimensions of the bars were 3.5 cm x 20 cm x 1 cm. Water absorption values were determined by water saturation and Archimedes principle (ISO 10545-3).

The pyroplastic index (PI) of each samples were determined by three point test method after firing: where h is the thickness of the body, S the maximum deflection and L the distance between the refractory supports as indicated in Fig. 2 (Conserva et al., 2017).

$$PI = 4h^2 / 3L^4 S \quad (3)$$

The detection of the phases formed in the fired products was performed with a Rigaku Rint 2000 X-ray diffraction device. A full profile interpretation by Rietvelt refinement was carried out with the GSAS-EXP GUI software package. In addition, for microstructural examinations, secondary electron images were taken with scanning electron microscopy (SEM, Zeiss Supra 50 VP) at the fractured surfaces of the samples leached with 10% diluted HF. Light transmission of the fired samples were measured by TES 1332-lux meter according to TS EN 1184.

3. Results And Discussion

XRD patterns of the samples of BA00 and BA20 fired at HT01 were given in Fig. 3 and obtained quantification of crystalline and glassy phases by Rietvelt refinement of the XRD patterns were given in Fig. 4.

The phases obtained in the sample of BA00 (also Bone China) were; anorthite, cristobalite, quartz and glassy phase. Bone China bodies have high light transmission because the refractive index of the anorthite phase is close to the glassy phase (glass phase: 1.5 and anorthite: 1.58) (Güngör, 2018). Despite the same chemical composition of the whole bodies, the reason of the decrease of anorthite phase is the formation of glassy phase was increased as the amount of waste increased in the body composition. "The anorthite phase" from Bone China waste dissolved in the glassy phase and therefore the amount of anorthite in the composition decreased.

The total amount of quartz and cristobalite were decreased as the amount of waste increased in the compositions. Because of the increased amount of the glassy phase formation, quartz and cristobalite dissolved in the glassy phase. Cristobalite is a high temperature silica polymorph being stable in the temperature range of 1470–1705 °C, but also occurs out of its stability field as a metastable phase. Cristobalite also develops at $T \leq 1000$ °C from SiO₂ glass. Upon cooling, β -cristobalite turns into its tetragonal α phase at 270 °C, not being able to overcome the activation energy barrier to change into the stable silica phase (Pagliari et al., 2013)

Despite the absence of aluminium phosphate in the microstructure of Bone China body, aluminium phosphate started to form when the waste was added into the Bone China body composition. The amount of aluminium phosphate was increased as the amount of waste increased. Aluminium phosphate formed as a result of the reaction of PO₄ and alumina released from anorthite crystals dissolved from waste.

The water absorption (WA) results of the sintered samples are shown in Fig 5. Water absorption of the samples were decreased as the amount of waste in the composition was increased. This result showed that by introducing Bone China waste, a notable reduction in the sintering temperature occurred. As the amount of liquid phase in the microstructure increases, gaps between the grains are filled with the liquid phase and the density of the sample increases. The amount and viscosity of the glassy phase is a determiner for the rate of sintering. Decreased viscosity of the glassy phase increases the sintering rate of the polycrystalline ceramic (Lerdprom, 2014; Güngör & Ay, 2018). The viscosity of the glassy phases formed in the samples were determined according to Lakatos et al (1972) and the results were given in Fig. 6.

The viscosity of the glassy phases increased as the amount of Bone China waste increased. The reason of the increased sintering rate was the increased amount of glassy phase. The viscosity of the glassy phases were increased because of the increased dissolution of quartz as the amount of waste increased. The viscosity-temperature relationship of the glasses depends on the displacement behaviour of cations with silica (Hülseberg a.o., 2008).

The pyroplastic deformation results of the samples fired HT001 were given in Table 3. The pyroplastic deformation behaviour of the samples were increased as the amount of glassy phase in the microstructure of the samples increased. Because of the increased amount of the glassy phase, slippage tendency of the grains increased at the maximum temperature of firing process and as a result of increased slippage tendency pyroplastic deformation increased. Backscattered electron (BSE) images of the fractured surfaces of the specimens produced after firing at HT01 are given in Fig. 7. The main phase of the microstructures for the samples of BA00 and BA20 was anorthite. The another phase that determined for BA20 was aluminium phosphate also determined by XRD analysis.

According to the experimental results, samples fired at 1250 °C, sintering rate was increased as a result of increased waste in the compositions. According to these results, in order to save energy by reducing the firing temperature of the samples, the sintering rate of the samples were examined by firing at lower temperature than the first step of the study as shown in Fig. 1. The water absorption and pyroplastic deformation results of the samples were given in Table 4. The water absorption of the samples were decreased and the pyroplastic deformation of the samples were increased as the amount of waste increased. When the results of water absorption and pyroplastic deformation index results of the sample of BA20 fired at HT02 were compared with the Bone China (BA00) which was fired at HT01, the water absorption and pyroplastic deformation values are similar.

Rietvelt analysis results of the samples fired at HT02 were given in Fig. 8. When the phase contents of the bodies are examined in comparison with the waste excluded Bone China, the samples containing 20 % of the waste fired at 1200 °C have similar phases and ratios with the waste excluded sample which was fired at 1250 °C.

4. Conclusion

Bone China waste bodies when fired at the Bone China firing cycle (1250 °C) had higher amount of glassy phase and lower amount of crystalline phases. As a result of dissolution of Bone China waste, amount of glassy phase increased.

This change in the microstructure decreased the water absorption value but increased the value of pyroplastic deformation. When the firing temperature was lowered to 1200 °C, samples with Bone China waste and the original Bone China fired at 1250 °C had similar water absorption values and also similar values were obtained for pyroplastic deformation. The reduction of firing

temperature obtained for Bone China waste bodies is explained by the microstructural evolution of the samples. Because nearly the same microstructure was obtained by the samples with Bone China waste.

Tables

Table 1. Particle size analysis results of the raw materials.

	d(0,1) µm	d(0,5) µm	d(0,9) µm
Quartz	4.5	21.1	65.2
Albite	4.9	24.3	72.1
Bone Ash	5.3	22.5	72.5
Bone Waste	7.4	29.15	81.52

Table 2. Chemical composition results of the raw materials.

	SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO	K₂O	Na₂O	Fe₂O₃	TiO₂	P₂O₅	LOI	Total
BA00	51.96	12.11	18.7	1.8	0.72	0.01	0.01	0.01	10.78	3.9	100
Quarz	99.63	0.11	0.01	0.01	0.04	0.1	0.07	0.01	0.02	-	100
Albite	69.31	20.5	0.1	0.1	0.21	9.57	0.1	0.1	0.01	-	100
Kaolin	47.09	38.15	0.01	0.01	1.12	0.03	0.34	0.04	0.01	13.2	100
Clay	47.4	36.82	0.01	0.01	1.71	0.02	0.38	0.05	0.02	13.58	100
Bone Ash	0.9	1.9	50.5	1.4	1.35	2.15	0.3	-	37.2	4.3	100

Table 3. Pyroplastic index results of the samples fired at HT01.

Sample	PI (cm⁻¹(10⁻⁵))
BA00	7.90
BA05	9.12
BA10	10.24
BA15	11.49
BA20	12.84

Table 4. Water absorption and pyroplastic index results of the samples fired at HT02.

Sample	Water Absorption %	PI (cm⁻¹(10⁻⁵))
BA00	2.11	4.70
BA05	1.68	5.61
BA10	1.32	6.29
BA15	0.89	7.29
BA20	0.57	8.11

Figures

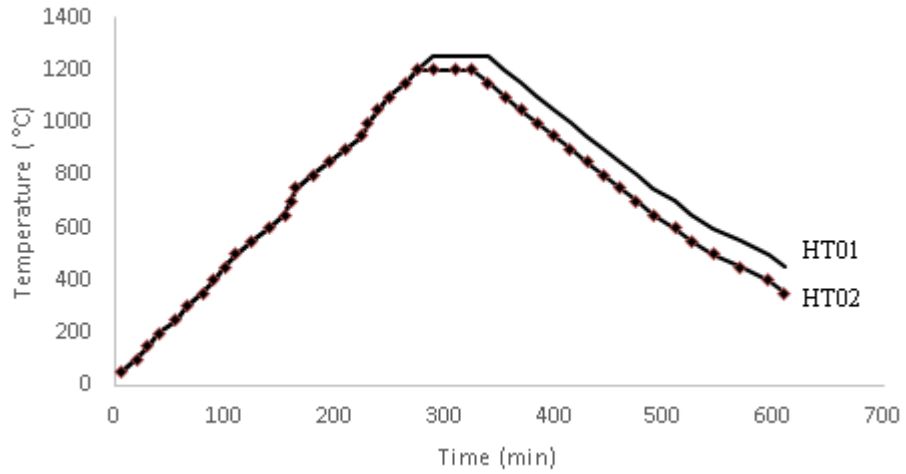


Fig 1. Firing cycles of the samples

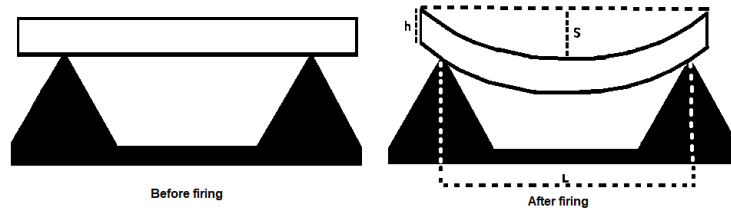


Fig.2. Positioning of the sample before and after firing for pyroplastic index assay.

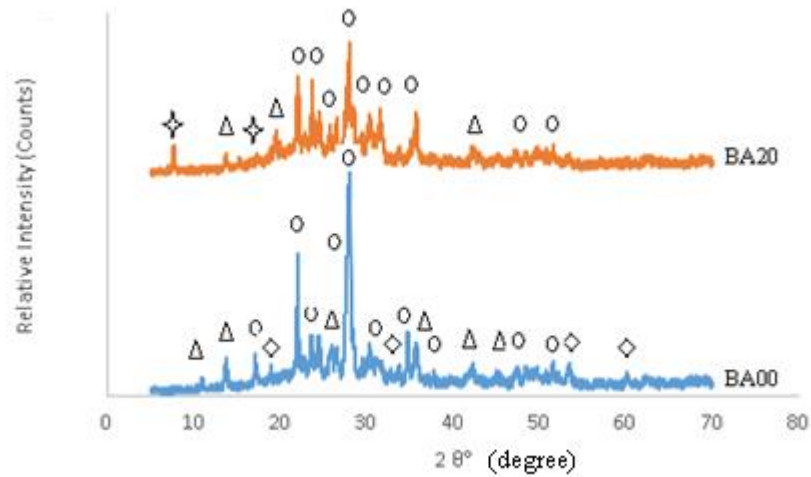


Fig 3. XRD analysis results of the samples fired at 1250 °C Δ : quartz, \diamond : cristoballite, \circ : anorthite, \star : Aluminum Phosphate.

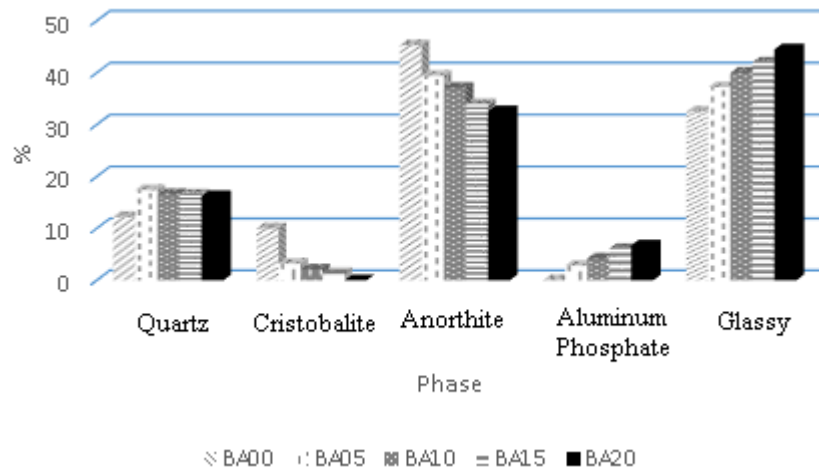


Fig 4. Rietvelt analysis results of the samples fired at HT01.

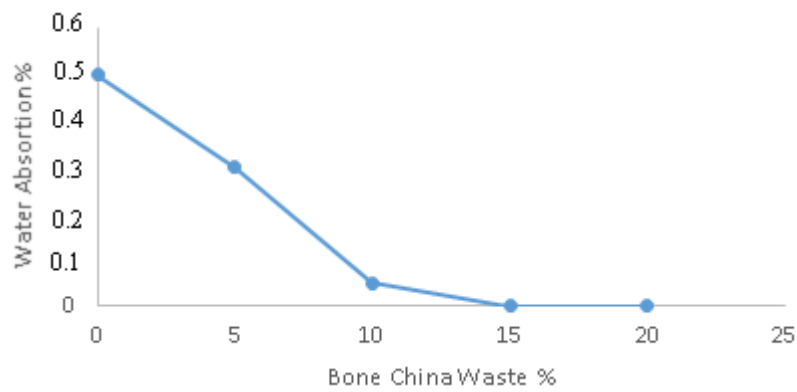


Fig. 5. Water absorption results of the samples fired at HT01.

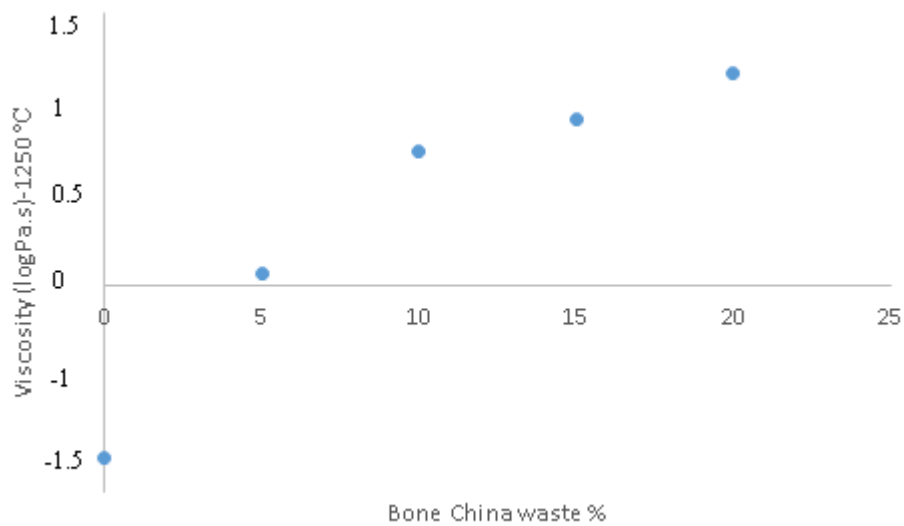


Fig. 6. Viscosity of the glassy phases of the samples fired at HT01.

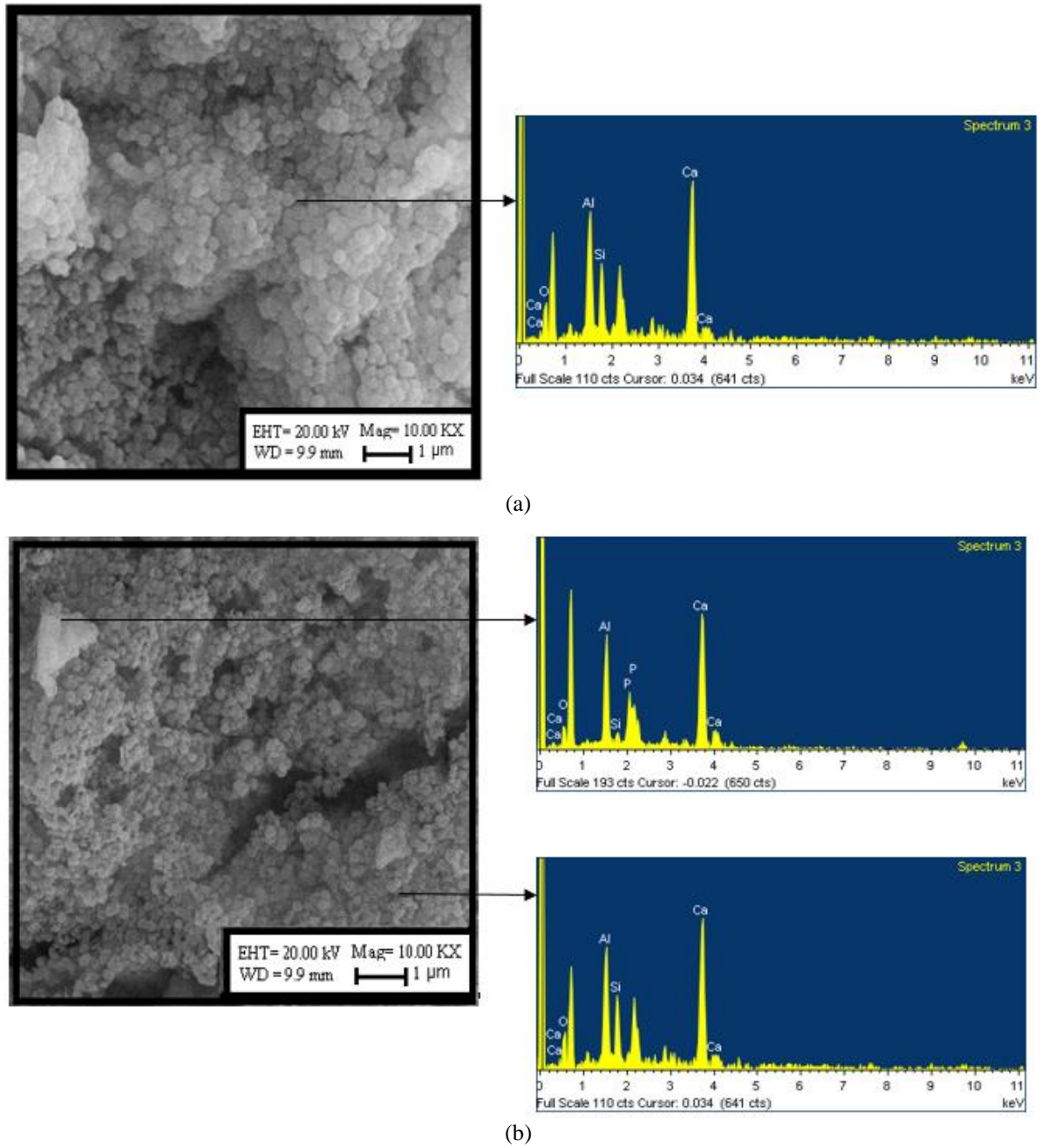


Fig. 7. SEM and EDX images of the samples fired at HT0; (a) BA00 (b) BA20

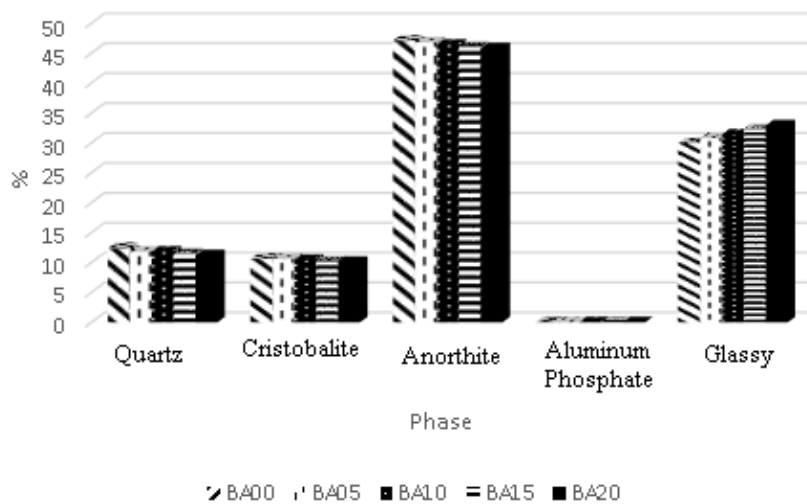


Fig 8. Rietvelt analysis results of the samples fired HT02.

References

- Batista, S.A. F.& Hand, R.J. (2001). Fracture toughness of Bone China and hard porcelain, Br. Ceram. Trans., 100 (6), 256-259 doi: [10.1179/bct.2001.100.6.256](https://doi.org/10.1179/bct.2001.100.6.256).
- Bragança, S.R. & Bergman, B.R. (2008), A comparative study between Bone China and hard porcelain. Industrial Ceramics, 28(3):189-194.
- Carus, L. A., Souza, F., Bragança, S.R. (2012) , Use of Wollastonite as a Flux for Bone China Bodies, Int. Scholarly Research Network, 701821.doi: 10.5402/2012/701821.
- Conserva, L.R.S., Melchiades,F.G., Nastri, S., Boschi, A.O., Dondi, M., Guarini, G., Raimondo, M. (2017). Pyroplastic deformation of porcelain stoneware tiles: wet vs. dry processing, J. Eur. Ceram. Soc., 37, 333–342.
- Douglas, G., Kaneko, T.T., Kahn, H., Conceição, E.S.& Antoniassi, L. (2015), Using bone ash as an additive in porcelain sintering, Ceram. Int., 41, 487-496, doi: 10.1016/j.ceramint.2014.08.096.
- Güngör, F. (2018). Investigation of pyroplastic deformation of whitewares: Effect of crystal phases in CaO based glassy phase. Ceram. Int., 44, 13360-13366.
- Güngör, F.& Ay, N. (2018). The effect of particle size of body components on the processing parameters of semi transparent porcelain. Ceram. Int., 44, 10611-10620.
- Hülseberg D., Harnisch A., Bismarck A. (2008), Microstructuring of Glasses, Berlin, Springer.
- Iqbal, Y., Messer, P.F., Lee, W. E., (2000), Non equilibrium microstructure of Bone China. Br. Ceram. Trans, 99 (3), 110-116.doi: [10.1179/096797800680811](https://doi.org/10.1179/096797800680811).
- Kara, A. (2004). An Investigation Into Bloating Behaviour of Bone China Body During Biscuit Firing. Key Eng. Materials, 264-268. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.264-268.1717
- Kara, A. & Stevens, R.(2002b). Characterisation of biscuit fired Bone China body microstructure. Part 2: Transmission electron microscopy (TEM) of glassy phase. J. Eur. Ceram. Soc., 22, 737-743.
- Kara A. & Stevens R. (2002a), Characterisation of biscuit fired Bone China body microstructure. Part 1: XRD and SEM of crystalline phases, Jour., Euro. Ceram. Soc., 22, 731-736, [doi: 10.1016/S0955-2219\(01\)00371-5](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(01)00371-5)
- Lakatos, T., Johansson, L. G., Simmingsköld, B. (1972). Viscosity temperature relations in the glass system SiO₂-Al₂O₃-Na₂O-K₂O-CaO-MgO in the composition range of technical glasses. Glass Technology, 13,(3), 88-95.
- Lerdprom, W. (2014). Firing of porcelain, Alfred University, Master of Science thesis, Alfred Universty, Alfred, Newyork, USA.
- Pagliari, L., Dapiaggi M., Pavese A., Francescon F., (2013). A kinetic study of the quartz crystobalite phase transition. J. Eur. Ceram. Soc. 33, 3403–3410.
- Rado, P. (1981), Bone China, Ceramic Monographs- Handbook of Ceramics. Freiburg, MA: Verlag Schmid GmbH.
- Dodd, A. E. (1964), Dictionary of ceramics, London, MA: George Newnes.



Mekanik Tapalardaki Pandül ve Rotor Ağırlık Değişimlerinin Namlu Önü Emniyetine Etkilerinin İncelenmesi

Investigation Of The Effects Of Changes In Weights Of Pallets And Rotors In Mechanical Fuzes On Muzzle Safety

Zühtü Onur Pehlivanlı¹, Serhad Yıldız²

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

² Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 26/02/2019

Kabul/Accepted: 14/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Bu çalışmada, mühimmatın atış öncesinde, atış anında ve atış sonrasında fonksiyon gösterdiği süreye kadar, personel güvenliğini sağlayan topçu ve havan güvenlik ve kurma mekanizmalarında yer alan, pandül ve rotor ağırlıklarının kurulma süresine yani namlu önü emniyet mesafesine olan etkileri araştırılmıştır. Deneysel olarak yapılan bu çalışmada dönüşüz havan mühimmatlarında kullanılan havan tapasındaki pandüllerin ve dönülü topçu mühimmatlarında kullanılan topçu tapasındaki rotorların ağırlıkları değiştirilerek güvenlik ve kurma mekanizmalarının kurulma süreleri incelenmiştir. Pandüllerde %7-38'e kadar, rotorlarda ise %9-17'ye kadar ağırlık düşürülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda pandüllerin ağırlıklarındaki azalışın tapa kurulma sürelerini azalttığı ancak rotorlarda ağırlık düşüşünün tapa kurulma süresini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Tapa, Güvenlik ve Kurma Mekanizması (GKM), Pandül, Rotor”

Abstract

In this study, the effects of pallet and rotor weights to the arming time, in other words muzzle safety, were investigated. Pallets and rotors are both located in the artillery and mortar SAD mechanisms which are used to provide safety of personnel before, during and after firing of the ammunition. In this experimental study, weights of the pallets have been altered for the smoothbore-mortar ammunition while similar changes have been applied to the weights of the rotors for the rifled-artillery ammunition and then, arming time of the SAD mechanisms were examined according to these changes. The weights have been reduced up to 7-38% for the pallets whereas up to 9-17% for the rotors. Eventually, it was concluded that arming time has been reduced by decreasing the weight of the pallets, however, arming time has been increased by applying the similar weight reduction operation to the rotors.

Key Words

“Fuzes, Safe And Arm Device (S&AD), Pallet, Rotor”

1. Giriş

Teknolojik olarak hızla gelişen dünyada, silah sistemleri de sürekli geliştirilmekte ve değişmektedir. Malzeme teknolojisindeki gelişmeler, yazılım alanında geliştirilen sistemler ve kimyasal patlayıcılar üzerinde yapılan çalışmaların bütünü silah sistemlerinde önemli gelişmeler kaydedilmesine yol açmıştır. Silah sistemlerindeki bütün çalışmalar sistemin güvenliğini en üst düzeye çıkartacak; aynı zamanda etkinliğini ve güvenilirliğini arttıracak şekilde kurgulanmaktadır.

Uçak bombaları, roketler, topçu mühimmatı, havan mühimmatı, uçaksavar mühimmatı, deniz mühimmatı, el bombaları, mayınlar, torpidolar vb. askeri silahlar ve mühimmatlar üretiminden görevini icra edinceye kadar ki ömür döngüsü boyunca tüm güvenlik ve emniyet şartlarını sağlayacak güvenlik sistemleri ve mekanizmaları bulundurmaları zorundadırlar. Bu güvenlik mekanizmalarından en önemlisi de tapalardır. Tapalar, mühimmatın aktivasyonunun hangi zamanda ve nerede gerçekleşmesi kararını verecek olan ve aynı zamanda namlu önü emniyeti de dahil tüm emniyet mekanizmalarını ve patlayıcı zinciri ve bileşenlerini üzerinde bulunduran, mühimmata baş veya dip kısmından bağlanan güvenlik mekanizmalarıdır. Tapa sistemlerinde namlu önü emniyet mesafesi de tapalar içerisindeki güvenlik ve kurma mekanizmalarıyla sağlanmaktadır. Güvenlik ve kurma mekanizmasının en önemli görevi mühimmatın namludan çıktıktan sonra dönü ve g kuvvetlerinin etkisiyle belli bir mesafeye gelene kadarki geçen sürede patlayıcı zincirini aynı eksen üzerine getirmektir.

Cooper and Bobetsky (2003), güvenli kurma mesafesini arttırmak için bazı çalışmalar yapmıştır. Birinci çalışmada çinko döküm olan rotoru alüminyum rotor olarak dizayn etmiştir. Böylece alüminyum rotorun kütlesi %56 azalmış buna bağlı olarak da kurulma süresi %32 artmıştır. İkinci çalışmada ise pandülün ağırlığı %61 arttırılmış ve buna bağlı olarak da kurulma süresi %40 artmıştır. Ayrıca bu iki çalışma birleştirilerek yani alüminyum rotor ve ağırlığı arttırılmış pandül birlikte kullanılmış ve kurulma süresinin %85 arttığı görülmüştür. Kurulma mesafeleri ise modifiyesiz standart rotor ve pandül birlikte kullanıldığında 250 feet olarak, alüminyum rotor ve ağırlığı arttırılmış pandül birlikte kullanıldığında ise 463 feet olarak ölçülmüştür.

Lewis (2003), güvenlik kurma mesafesini arttırmak için rotorun ağırlık merkezi aynı kalmak şartıyla, rotor üzerinde boşaltma yaparak rotoru hafifletmiş ve normalden iki kat daha ağır pandül ile birlikte kullanmıştır (Mofn GKM). Çalışmada kurulma süresi; devir testi, dinamik analiz ve Abaqus analiz yazılımı ile ölçülmüştür.

Geaney, Leng and Rhode (2014), bilgisayarlı deney tasarımı ve sonlu elemanlar istatistiksel analiz metotlarıyla 40 mm M549 A1 ve M550 tapalarındaki güvenlik kurma mekanizmalarındaki değişikliklerle kurma zamanını ölçmüş ve kurulma süresini etkileyen temel etkenleri belirlemiştir. Bilgisayarlı deney tasarımı ve sonlu elemanlar istatistiksel analiz sonuçları M549 A1 ve M550 GKM kurulma süreleri için benzer sonuçlar vermiş ve kurulma süresi değişimindeki tüm faktörlerin pandül-hareket nakil çarkı etkileşiminden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Ardak and Phate (2014), yaptığı çalışmada örnek iki dişli sisteminde pandülün süreye olan etkisini incelemiştir. Birinci dişli sisteminde pandül kullanmamış ve sistemde 330⁰ döndürülmek istenen dişli, 19,93 saniyede istenilen konuma gelmiştir. Bu sürede hareket nakil çarkı ise 11.000 tur atmıştır. İkinci dişli sisteminde ise pandül kullanmış olup sistemde 330⁰ döndürülmek istenilen dişli, 3600 saniyede istenilen konuma gelmiştir. Bu sürede pandül ile birlikte hareket eden hareket nakil çarkı 62 tur atmıştır. Çalışma sonucunda pandülün süreyi arttırdığı ve hareket nakil çarkını yavaşlattığı sonucuna varılmıştır.

Bu verilen çalışmalar literatürde tapalarla ilgili olarak yapılan önemli çalışmalar olmakla birlikte, tapalar ve tapalardaki güvenlik ve kurma mekanizmaları üzerine daha pek çok sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar ışığında bu çalışmalarda; dönüşüz havan tapası içerisinde yer alan pandüllerin ve dönülü topçu tapasında kullanılan rotorların ağırlıklarının tapa kurulma süresine yani namlu önü emniyet mesafesine olan etkilerinin incelenmesi planlanmıştır.

Bu kapsamda, havan tapaları için pandül, topçu tapalarında ise rotor ele alınarak tapa kurulma sürelerindeki değişimler deneysel olarak incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzeme

Rotor malzemesi olarak, C36000-H02 pirinç malzeme kullanılmış olup malzemenin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Standart ölçülere sahip 5 adet rotor CNC (Computer Numeric Control) tezgâhında talaş kaldırılarak üretilmiştir. Daha sonra hazırlanan standart rotordardan 4 adedinin, rotor ağırlığının kurulma süresine olan etkisini incelemek amacıyla ağırlıkları azaltılmıştır. Pandül malzemesi olarak, C35300-H06 pirinç malzeme kullanılmış olup malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. 7 adet pandül de

rotorlarda olduğu gibi CNC tezgâhı kullanılarak imal edilmiştir. Daha sonra hazırlanan standart pandüllerden 6 adedinin, pandül ağırlığının kurulma süresine olan etkisini incelemek amacıyla ağırlıkları azaltılmıştır.

Tablo 1. Pandül ve rotor imalatında kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (Mpa)	Sertlik (RockwellB)
C36000- H02	8,498	345	140	96.527	78
C35300- H06	8,470	338-586	117-427	117.211	75

2.2. Deney numunelerinin hazırlanması

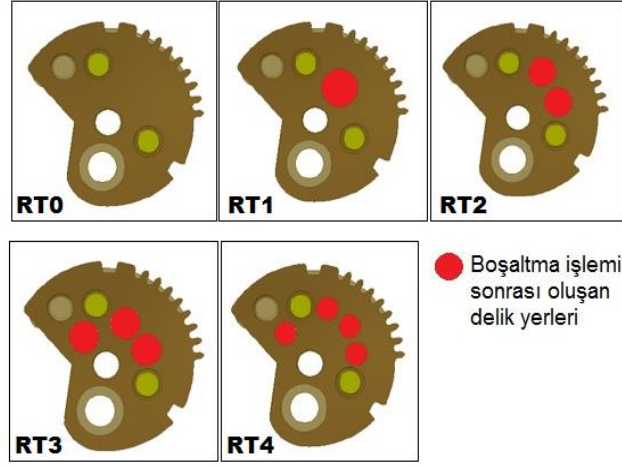
Rotor ve pandüllerin ağırlık değişimlerini görmek için öncelikle 3D CAD programları yardımıyla bilgisayar ortamında rotorun katı modeli hazırlanmış ve yine aynı programlar yardımıyla rotor ve pandüllerin ağırlık merkezi belirlenmiştir. Daha sonra bu ağırlık merkezinde küçük değişikliklere müsaade edilecek (fonksiyonu etkilemeyecek) şekilde rotor üzerine farklı çap ve sayıda boşaltma yapılmış ve boşaltılan deliklerin koordinatları ve referans alınan noktaları kaydedilmiştir. Daha sonra hazırlanmış olan standart rotor numunelerine Henri Hauser Bienne marka koordinat matkap tezgâhı yardımıyla istenilen koordinatlardaki delikler açılarak kütle boşaltma işlemi yapılmıştır. Standart ve kütle boşaltma işlemi sonucundaki rotor numuneleri Şekil 1’de, özellikleri ise Tablo 2’de gösterilmiştir.

Pandül numunelerinin ağırlıklarını düşürmek için ise Fritz Werner Werkzeugmaschinen marka profil tezgahı kullanılmıştır. 3D CAD programını yardımıyla belirlenen kısımlar profil tezgahında talaş kaldırılarak istenilen ölçülere getirilmiştir. Ağırlık düşürme işlemi sonucunda elde edilen pandüller Şekil 2’de, özellikleri ise Tablo 3’te gösterilmiştir.

Tüm pandül ve rotorların ağırlıkları, Sartorius FC06BBE-SX marka elektronik hassas terazi kullanılarak 1/1000 ölçüm hassasiyetle ölçülmüştür.

Tablo 2. Rotor deney numuneleri ve özellikleri

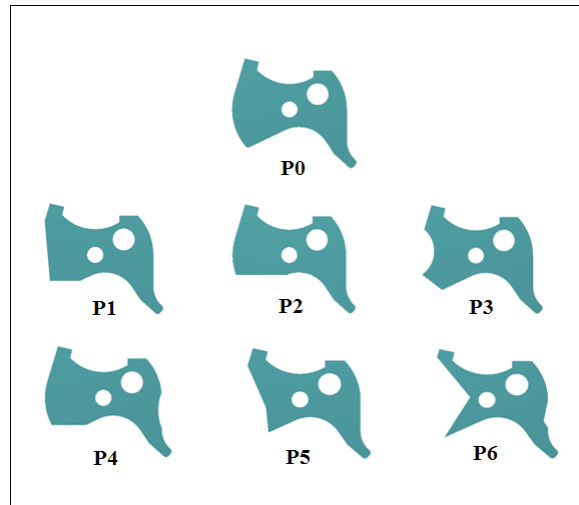
Numune Kodu	Standart Rotor Ağırlığı (gr)	Ağırlığı Düşürülmüş Rotor Ağırlığı (gr)	GKM Kurulma Süresi (ms)	GKM Kurulma Devri (d/dak)	Oluşturulan Delik Çapları (mm)	Boşaltılan Kütle Miktarı (gr)
RT0	18,878	18,878	800	3000	-	0
RT1	18,872	17,219	830	3000	1x5	1,653
RT2	18,868	16,755	872	3000	2x4	2,113
RT3	18,879	16,489	883	3000	3x4	2,39
RT4	18,881	15,693	1100	3000	4x3	3,188



Şekil 1. Deneysel çalışmada kullanılan standart (RT0) ve modifiye rotorlar

Tablo 3. Pandül deney numuneleri ve özellikleri

Pandül Numunesi	Standart Pandül Ağırlığı (gr)	Ağırlığı Düşürülmüş Pandül Ağırlığı (gr)	Kurulma süresi (ms)	Boşaltılan Kütle Miktarı (gr)
P0	2,843	2,843	901	0
P1	2,830	2,637	815	0,193
P2	2,841	2,591	795	0,25
P3	2,844	2,547	775	0,297
P4	2,839	2,370	739	0,469
P5	2,829	2,103	701	0,726
P6	2,846	1,754	642	1,092



Şekil 2. Deneysel çalışmada kullanılan standart (P0) ve modifiye pandüller

3. Bulgular

Hazırlanan pandül numunelerinin kurulma sürelerinin belirlenmesi için pandüller, incelenen havan tapasına monte edilerek kurulma süreleri ölçülmüştür. Havan tapasının kurulma süresini ölçmek için Şekil 3'te görülen zaman test cihazı kullanılmıştır. Zaman test cihazında; tapa tezgaha bağlandıktan sonra mühimmatın gidiş yönü aksine oluşan atalet kuvvetini simule eden kol aşağı indirilerek rotorun hareket etmesini önleyen millerin yay kuvvetlerini yenerek aşağı inmesini sağlar böylece rotor kendisini tutan millerin çekilmesiyle depolanmış yay kuvveti sayesinde harekete başlar. Hareket başladığı an titreşim de başlar ve tezgâh titreşim sona erene kadar süreyi devam ettirir. Titreşimi baz alarak çalışan zaman test cihazı titreşimin bittiği anı, yani tapanın kurulma süresini verir.

Aynı şekilde modifiyeli rotorlar aynı topçu tapası güvenlik kurma mekanizmasına monte edilerek kurulma işlemi gerçekleştirilmiştir. Tapanın kurulma işlemi için Şekil 4'te görülen devir tezgahı kullanılmıştır. Devir tezgahı elektrik motoru, redüktör ve takometreden oluşmakta olup, maksimum devri 4000 d/dak'dır. Devir tezgahına topçu tapası güvenlik kurma mekanizması bağlandıktan sonra kurulma süreleri ölçülmüştür. Kurulma sürelerinin ölçülmesinde lazer renk sensörü kullanılmıştır.



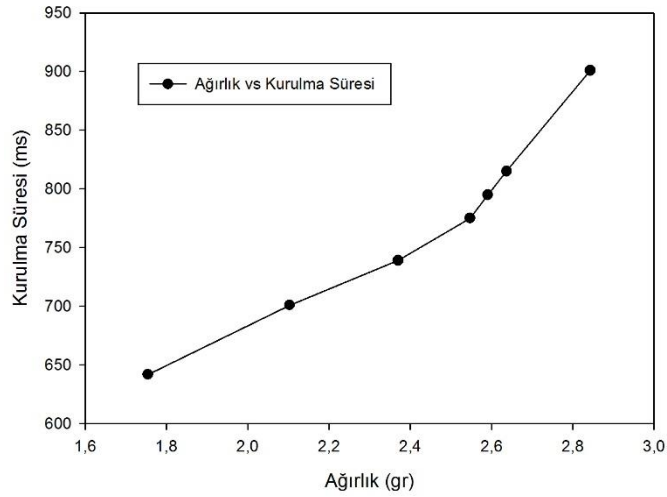
Şekil 3. Havan Zaman Test Cihazı



Şekil 4. Devir Tezgahı

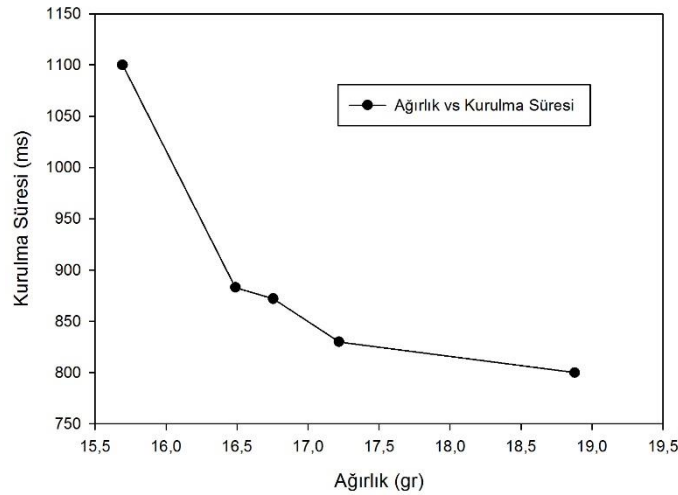
4. Tartışma ve Sonuç

Havan Tapasında kullanılan pandüllerden 7 adet pandül numunesi alınmış ve bu pandüller aynı havan tapasına monte edilerek kurulma süreleri zaman test cihazında ölçülmüştür ve kaydedilmiştir. Bu kapsamda incelenen pandüllerin kurulma sürelerinde ± 20 ms (mili saniye) sapma olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra bu pandüllerden 6 tanesi yukarıda açıklanan ağırlık değiştirme işlemine tutulmuştur ve sonrasında havan tapasına tekrar monte edilerek kurulma süreleri test cihazında ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Elde edilen deney sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Kurulma süresinin pandül ağırlığıyla değişimi

Topçu tapasının güvenlik kurma mekanizmasında kullanılan rotorlardan, ağırlıkları $\pm 0,013$ gr sapma olan 5 adet rotor seçilmiştir. Seçilen bu rotorlar daha sonra aynı standart güvenlik kurma mekanizmasına monte edilmiş ve devir tezgâhında 3000 devir/dakikadaki kurulma süreleri lazer renk sensörü ile ölçülmüştür. Ölçülen kurulma süreleri ve ağırlık arasındaki ilişki Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Kurulma süresinin rotor ağırlığıyla değişimi

4.1. Rotor ağırlığının kurulma süresine etkisi

Rotor ağırlığı-kurulma süresi ilişkisini incelemek için dönülü topçu tapasında kullanılan, kütle boşaltması yapılarak hazırlanmış 5 farklı rotor numunesi üzerinde yapılan deneysel çalışma sonuçları incelendiğinde rotor ağırlığı azaldıkça kurma süresinin arttığı görülmüştür. Bu sonuç detonatörü muhafaza eden ve patlayıcı zincirinin aynı eksene gelmesini sağlayan rotorun bu dinamik hareketini dönme ekseninden kaçık pozisyonlamasıyla ve mühimmatın dönüşüyle alan mekanizmalarda geçerlidir. Rotor ağırlığının artması namlu önü emniyeti açısından incelendiğinde ise rotor ağırlığı düştükçe namlu önü emniyet mesafesinin de azaldığı görülmüştür.

4.2. Pandül ağırlığının kurulma süresine etkisi

Pandül ağırlığı-kurulma süresi ilişkisini incelemek için 7 farklı pandülün, fonksiyonunda ve çalışma şeklinde değişiklik olmayacak şekilde kütle boşaltması yapılmıştır ve pandül ağırlığı üzerinde yapılan deneysel çalışma sonuçları incelendiğinde, kurulma süresinin pandül ağırlığıyla doğrusal değiştiği görülmüştür. Tapaların emniyetini sağlayan güvenlik kurma mekanizmalarında sönümleyici etki yapan pandülün ağırlığı arttıkça mekanizmanın tüm hareketi boyunca geçen süre yani kurulma süresinin arttığı görülmüştür. Kurulma süresinin artması direk olarak namlu önü emniyet mesafesini de arttırmaktadır.

Sonuç olarak rotor ve pandül ağırlıklarının tapa kurulma sürelerine olan etkilerini incelemek üzere yapılan deneysel çalışma sonuçları, rotor ağırlığı azaldıkça kurulma süresinin de rotor ağırlığına bağlı olarak doğrusal olarak azaldığı ancak pandül ağırlığında ki azalışın kurulma süresiyle ters orantılı olarak değiştiğini göstermiştir. Bu durum bize, yapılacak tapa tasarımlarında seçilecek rotor ve pandül ağırlığının dolayısıyla seçilecek malzemenin ne kadar önemli olduğunu ifade etmektedir. Çünkü kurulma süresi sayesinde namlu önü emniyet mesafesi belirlenmektedir. Namlu önü emniyet mesafesi personel ve donanım emniyeti için hayati öneme sahiptir. Bu sonuçlar 2003 yılında Keith Lewis ve Edward F. Cooper tarafından yapılan çalışmalarla benzer sonuçlar göstermiştir ve yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarını destekleyici niteliktedir.

Referanslar

- Ardak, M. B., & Phate, M. R. (2014). Mathematical Modeling and Computer Simulation For Mechanical Timer Runway Escapement Mechanism, Mechanical Engineering Department, Pune University, Padmabhooshan Vasantadada Patil Institute of Technology Pune, India.
- Burke, P., & Pergolizzi, T. (2008). XM1156 Precision Guidance Kit (PGK), Information Briefing for 52nd Annual Fuze Conference.
- Campion, B. (2007). Nexter Munition, 51st Annual NDIA Fuze Conference, Nashville.
- Cooper, E. F., & Bobetsky, A. (2003). L3 Communications Bt fuze products division 47th DIA Annual Fuze Conference.
- Deeds, M., & Cox, A. (2009). Variable Acceleration Profiling and Characterization of S&A Escapement Mechanisms Indian Head Division Naval Surface Warfare Center Indian Head, MD NDIA Fuze Conference.
- Finch, C. (2003). Naval Surface Warfare Center Dahlgren 47th Annual Fuze Conference "Enhancing Weapon Performance".
- Fowler, S. E. (1999). Safety and Arming Device Design Principles, Naval Air Warfare Center Weapons Division, China Lake, CA.
- Geaney, J. (2009). Rdecom, NDIA Fuze Conference Orlando, Florida.
- Hendershot, J. (2012). Navy Fuze S&T and Acquisition Strategy (NAVSEA), 56th Annual NDIA Fuze Conference, Baltimore.
- Kautzsch, K. (2008). Junghans Microtec, 52nd NDIA Annual Conference.
- Kautzsch, K. B. (2007). Junghans Feinwerktechnik GmbH & Co. KG, 51st Annual Fuze Conference, Nashville, TN.
- Lewis, K. (2003). Naval Surface Warfare Center Dahlgren 47th Annual Fuze Conference "Enhancing Weapon Performance".
- Lowen, G. G., & Tepper, F. R. (1978). Dynamics of Pin Pallet Runaway Escapement.
- Mil- Std- 1316E. (1998). Design Criteria Standard Fuze Design, Safety Criteria For, Department of Defense, United States of America.
- Overman, D. L. (1971). Analysis Of M125 Booster Mechanism.
- Rhode, M., Geaney, J., & Leng, D. (2014). RDECOM, 57th NDIA Annual Fuze Conference.
- STANAG 2916. (1989). Nose Fuze Contours And Matching Projectile Cavities For Artillery And Mortar Projectiles, NATO Standardization Agency (NSA).
- Tapa Dizaynında Esaslar. (1975). Mke Mühimmat Fabrikası Etüd ve Geliştirme Kısım Müdürlüğü.
- Ulaş, F. (2012). Mühimmatlar için elektronik zaman ayarlı ateşleyici sistem tasarım, Elektrik Elektronik Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi.
- Wagner, J. (2006). Junghans Feinwerktechnik GmbH & Co. KG, 50th Annual NDIA Fuze Conference, Norfolk, VA.
- Will, B. (2007). Naval Surface Warfare Center (NAVSEA), 51st NDIA Fuze Conference, Nashville, Tennessee.
- Yaşar, H. (1979). Mühimmatın Esasları.



Karabük İl Merkezinde Bulunan Şehit Şendoğan Topçu İlkokulunun Bedensel Engelli Bireyler İçin Ulaşılabilirliğinin İncelenmesi

Examination of the Accessibility for the Physically Disabled Individuals of Şehit Şendoğan Topçu Primary School in Karabük Province Centre

Şenol Gürsoy¹, Cem Cüneyt Ceylan², Yüksel Turcan³

¹Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 78050 Karabük, TÜRKİYE

²Karabük Üniversitesi, Safranbolu MYO, Mimari Restorasyon Programı, 78600 Karabük, TÜRKİYE

³Karabük Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 78600 Karabük, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 02/05/2018

Kabul/Accepted: 15/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Türkiye’de engelli bireylerin mevcut fiziksel mekanlara ulaşılabilirliği için uygulanan iyileştirmelerin maalesef yasal zorunlulukları yerine getirmek amacıyla yapıldığı görülmektedir. Engelli bireylerin özellikle eğitim ve sağlık gibi toplumsal yaşama katılım süreçlerinin sorunsuz bir şekilde sağlanmasında bazı önlemlerin alınmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada Karabük ilinde bulunan Milli Eğitim bağlı okul binalarının bedensel engelli bireyler için ne derecede ulaşılabilir olduğunu incelenmektedir. Bu amaçla engelli bireylerin ulaşılabilirliği için seçilen betonarme bir okul binasının Sta4-Cad programı yardımıyla yapısal çözümlenmeleri gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sonuçlar, Milli Eğitime bağlı Karabük il merkezindeki ilk ve orta öğretim okul binalarının çoğunluğunun engelli bireylerin ulaşılabilirliği bakımından uygun olmadığını göstermektedir. Ayrıca, söz konusu okul binalarının çoğunun bugün yürürlükte bulunan Türkiye Deprem Yönetmeliğindeki koşullarını sağlamadığı ve güçlendirilmesi gerektiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler

“Eğitim binaları, engelli ulaşılabilirliği, engelli yönetmeliği, STA4-Cad”

Abstract

Unfortunately, it is seen that it was made in order to fulfill the legal requirements of improvements applied to the accessibility of the existing physical spaces of people with disabilities in Turkey. It is necessary to take of precautions to ensuring that the disabled people’s participation of processes in social life such as especially education and health can be ensured without problems. In this study, it is examined what extent that is reached for physically handicapped individuals of the National Education affiliated school buildings in Karabük province. For this purpose, structural analysis of a reinforced concrete school building selected for the accessibility of disabled individuals is carried out with the aid of the Sta4-Cad program. The obtained results show that most of the primary and secondary school buildings in the Karabük provincial centre affiliated National Education are not suitable for the accessibility of the disabled individuals. In addition, most of the said school buildings not provide the conditions of the Turkey Earthquake regulations in force today, and it is seen that need to be strengthened.

Key Words

“Education buildings, disabled accessibility, disability regulation, STA4-Cad”

1. Giriş

Türkiye’de engelli bireyler toplumsal yaşam içinde birtakım sorunlarla karşılaşmaktadırlar. Bu problemlerinin çözülmesiyle birlikte engelli bireylerin de erişilebilir bir çevreye ve daha yüksek hayat standartlarına kavuşmuş olacağı açıktır. Günümüzde tüm dünyada engellilere yönelik tasarımın gerekliliği, hatta farklı engel gruplarının yaşam çevresini kullanımlarında kolaylık sağlayan tasarımların uygulanması, bir zorunluluk haline getirilmiştir. Türkiye’de ise; engellilere yönelik tasarım çalışmalarının maalesef oldukça geç tarihlerde olduğu görülmektedir.

572 sayılı Kanun Hükmündeki Kararname (KHK) ile engellilerin ulaşılabilirliğinin ve erişilebilirliğinin sağlanmasıyla ilgili yasal düzenleme yapılmıştır (572 Sayılı KHK, 1997). 572 sayılı KHK ile yapılan bu değişikliğin ardından, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı tarafından ulaşılabilirlikle ilgili düzenlenen ve eklenen 3194 sayılı İmar Kanunu’nun ilgili yönetmelikleri yeniden düzenlenerek 23804 Sayılı Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe girmiştir.

Türkiye de 1982 yılında yürürlüğe giren Türkiye Cumhuriyeti Anayasasında engelli bireylerin hakları güvence altına alınmıştır. T.C. Anayasası’nın 42. maddesinde “*Kimse, eğitim ve öğrenim hakkından yoksun bırakılamaz*” hükmü ile bireylerin eğitim hakkı çok açık bir şekilde belirtilmiştir. Ayrıca 1982 Anayasasının 61. maddesinde ise “*Devlet, sakatların korunmalarını ve toplum hayatına uyumlarını sağlayıcı tedbirleri alır*” hükmünün yer aldığı görülmektedir (2709 Sayılı Kanun, 1982).

5378 sayılı Özürlüler ve bazı kanun ve kanun hükmünde kararnamelerde değişiklik yapılması hakkındaki kanunda eğitim hakkı düzenlemiş ve engelli olmayanlarla eşit eğitim imkanı sağlanması gerektiği belirtilmiştir. Böylelikle engelli bireylerin kendi yaşlılarıyla birlikte eğitim alması hedeflenmiştir. Ayrıca engelli üniversite öğrencilerinin öğrenim hayatlarını kolaylaştırmak amacıyla engelliler danışma ve koordinasyon merkezi kurulması gerektiği belirtilmiştir (5378 Sayılı kanun, 2005).

222 sayılı ilköğretim ve eğitim kanununun 12. maddesinde de “*Mecburi ilköğrenim çağında buldukları halde zihnen, beden, ruhen ve sosyal bakımdan engelli olan çocukların özel eğitim ve öğretim görmeleri sağlanır*” şartı bulunmaktadır (222 Sayılı kanun, 1961).

Türkiye’de 2005 yılında yürürlüğe giren Özürlüler yasasıyla birlikte erişilebilirlik için 7 yıllık süre tanınmış ancak bu sürenin sonunda yapılan düzenlemeler yeterli görülmediği için 3 yıllık bir ek süre daha verilmiştir. Bu çalışmada Karabük İli kent merkezindeki Milli Eğitime bağlı ilk ve orta öğretim okul binalarının çalışma alanı olarak seçilmesindeki başlıca etken, Türkiye’de engellilerle ilgili düzenlemelerin yasal bir zorunluluk hale gelmesinden sonra, daha önceki yıllarda yapıyı tamamlanmış olan okul binalarının birçok yönüyle erişilebilirlik düzeylerinin düşük olmasıdır (Gürsoy ve diğ., 2017).

Bedensel engelli çocukların, eğitim-öğretim aşamalarının daha ilk evrelerinde fiziksel çevre ve toplum tarafından engellenmesi onun gelecekteki yaşantısını önemli derecede etkileyeceği bir gerçektir. Temel eğitimin bir hak olduğu dolayısıyla da bu haktan bütün bireylerin (eğitim çağındaki çocukların) faydalanması gerektiği düşüncesi bu çalışmanın ana temasını oluşturmaktadır. Bu nedenle, özellikle bedensel, engelli çocukların engelli olmayan çocuklarla birlikte eğitim binalarında herhangi bir engelle karşılaşmadan temel eğitimlerinin alınmasının sağlanması gerekmektedir. Bu çalışmasıyla bedensel engelli çocukların önerilecek ve/veya yapılacak tasarımlarla diğer çocuklarla birlikte eşit şartlarda eğitim görmesi sağlamak ve seçilen okul binası ile ilgili gerekli bilgileri toplayarak bazı hususlara dikkat çekmek hedeflenmektedir. Böylelikle bedensel engelli çocukların toplumsal yaşama tam ve eşit katılımı sağlanmış olacaktır.

Bu çalışmada, Karabük ili Milli Eğitim Müdürlüğüne bağlı ilk ve orta öğretim okul binalarının engelliler için ulaşılabilirliğinin incelenmesi kapsamında seçilen örnek okul binasının engelli bireylerin ulaşılabilirliği için yapılacak müdahale ve/veya iyileştirmelerin binanın davranışlarına etkisi Sta4-Cad (Sta4-Cad, 2014) programı yardımıyla karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Çalışmanın sonunda yapısal çözümlerden elde edilen bulgular karşılaştırmalı irdelenerek, engelli bireylerin ulaşılabilirliği için yapılacak müdahale ve/veya iyileştirmelerin daha güvenilir ve ekonomik tasarımlarına ilişkin bazı sonuçlar ve önerilerin sunulması hedeflenmektedir.

2. Engelliler İçin Mekân Tasarımı

Engelli kullanıcılar için mekânların mimari tasarımlarında, genel kullanıcılar için düşünülen temel gereksinimler ile birlikte engelli bireylerin fiziksel ve/veya psikolojik durumlarını da dikkate almak gerekmektedir. Gerçekten engelli kullanıcılar için mimari mekân tasarımı, engel durumlarından dolayı söz konusu bireylerin kısıtlanan hareketlerini hem fizyolojik hem de psikolojik donanımlar vasıtasıyla yapabilmesi ve yalnız başlarına hayatını devam ettirebilmesi sağlamalıdır. Engelli kullanıcılar için mekân tasarlanırken, söz konusu kullanıcının engelinin ne olduğu, hangi hareketleri yapmakta zorlandığı ve hangi hareketleri yapabildiği incelenmelidir. Asıl amaç engelli bireyin mekânda kimseye ihtiyaç duymadan bağımsız hareket edebilmesinin sağlanmasıdır.

Bu günkü tasarım prensipleri genellikle ortalama kadın veya erkek kullanıcılar esas alınarak oluşturulmuştur. Ancak çeşitli nedenlerle hareket kabiliyetleri kısıtlanan ve/veya hareket kabiliyetlerini büyük ölçüde kaybetmiş dolayısıyla da yardımcı ekipmanlarla hayata katılan bireyler yaşam çevresinde farklı kullanım kolaylıklarına ihtiyaç duymaktadırlar.

Yaşadığımız fiziksel çevreyi tüm bireylere yönelik planlamayı *Evrensel Tasarım* olarak adlandırmak mümkündür. Evrensel tasarım, tüm bireylerin taleplerine karşılık veren tasarım yaklaşımıdır. Diğer bir ifadeyle evrensel tasarım, tüm bireylerin özel

muameleye ve ayrı tasarım çözümlerine gerek kalmadan herkesin kolayca kullanabileceği, erişilebilir olan, erişim ve kullanımda seçme özgürlüğü ve eşitlik sağlayan, güvenli ve nitelikli bir fiziksel çevreyi hedeflemektedir. Bu nedenle evrensel tasarımı, “herkes için tasarım” ve “yaşam boyu süren tasarım” biçiminde de ifade etmek mümkündür. Özetle evrensel tasarım prensibi aşağıda belirtilen ilkeleri sağladığı takdirde engelli bireylerin yaşam kalitesi en üst düzeye ulaşmış olacaktır.

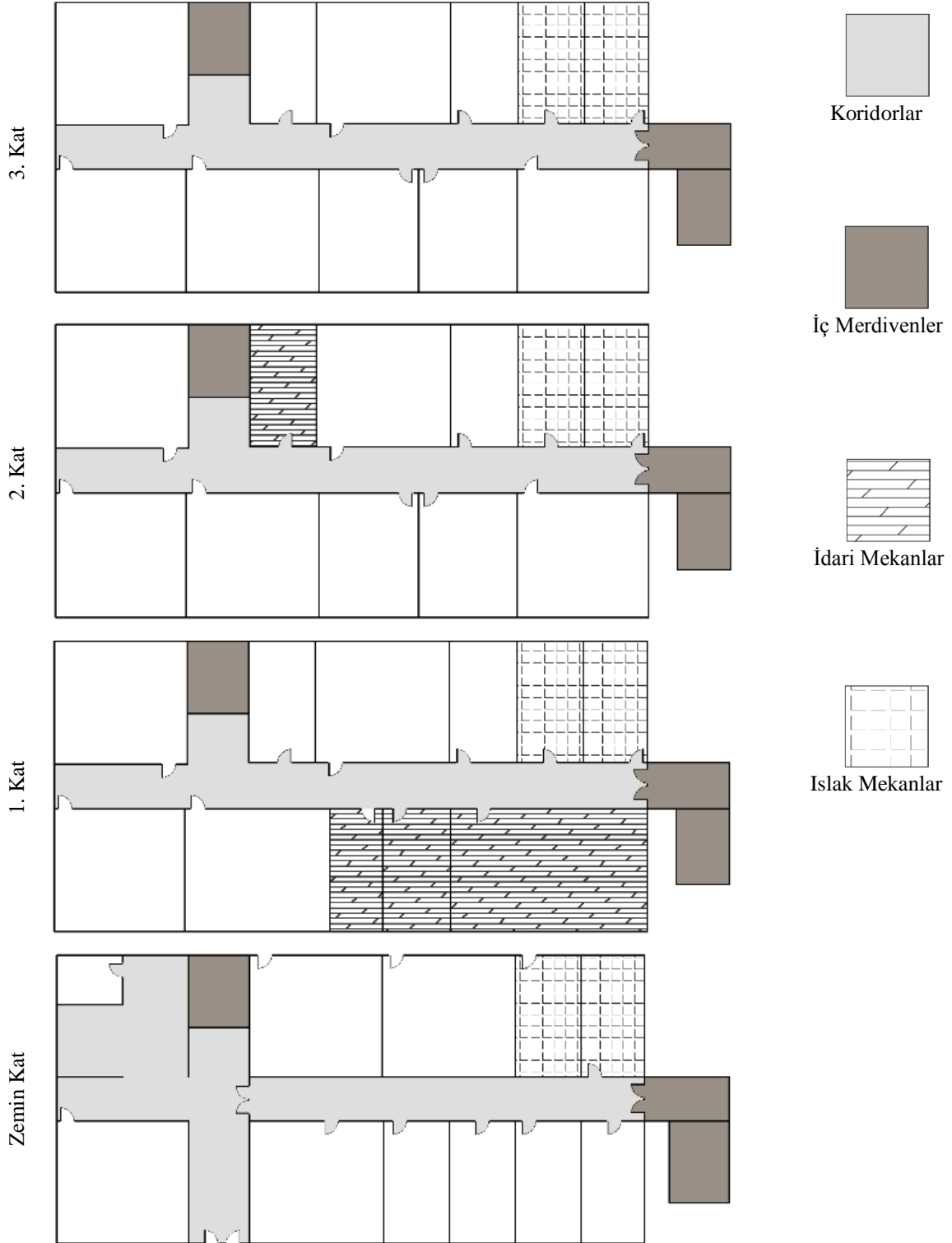
- 1) Eşit Kullanım; Tasarım, farklı insan grupları için kullanışlı olmalıdır.
 - Tüm kullanıcılar için kullanımda aynı kolaylığı sağlanmalı; mümkünse benzer, mümkün değilse eş değer uygulamalar yapılmalıdır.
 - Herhangi bir kullanıcıyı ayırmaktan kaçınılmalıdır.
 - Mahremiyet, koruma ve güvenlik tüm kullanıcılara eşit olarak sağlanmalıdır.
 - Gerçekleştirilecek tasarım tüm kullanıcılar için çekici hale getirilmelidir.
- 2) Kullanımda Esneklik; Tasarım farklı kişisel tercihleri barındırmalıdır.
 - Kullanım yöntemleri arasında seçenekler yaratılmalıdır.
 - Mümkünse sağ ve sol el erişimi ve kullanımı sağlanmalıdır.
 - Tam kullanım sağlanmalıdır.
 - Kullanıcı hızına uyumlu olmalıdır.
- 3) Basit ve Sezgisel Kullanım; Tasarım, kullanıcının tecrübesinden, dil yeteneğinden ve o anki ortama odaklanma seviyesinden bağımsız bir şekilde kolay anlaşılır olmalıdır.
 - Gerekli olmayan karmaşıklık barındırılmamalıdır.
 - Tasarım, kullanıcının beklenti ve sezgileri ile tutarlı olmalıdır.
 - Bilgiyi önemine göre düzenlemelidir.
 - İş süresince ve bitiminde aktif geri bildirim sağlanmalıdır.
- 4) Algılanabilir Bilgi; Tasarım, çevresel koşullara ve kullanıcının duyuusal yeteneklerine bakmaksızın gerekli olan bilgiyi kullanıcıya etkin bir şekilde iletmelidir.
 - Önemli bilgileri sunmak için farklı ortamlar (resimli, sözel ve kabartmalı) kullanılmalıdır.
 - Önemli bilgilerin “okunabilirliğini” en üst düzeye çıkarmalıdır.
 - Elemanlar tarif edilebilir şekillerde ayrıştırılmalıdır (örneğin; kullanım talimatlarını ve yön tariflerini kolay hale getirmek gibi).
 - Duyusal kısıtlamaları olan bireylerin kullandıkları aygıt ve tekniklere uyum sağlayabilmelidir.
- 5) Hatalara Dayanım; Tasarım, kaza ya da istenmeden yapılan hareketlerin kötü sonuçlarını en aza indirmelidir.
 - Elemanlar tehlike ve hataları en aza indirecek şekilde düzenlemelidir. En çok kullanılan elemanlar kolay erişilebilir, tehlikeli elemanlar ise izole edilmiş ya da korumaya alınmış olmalıdır.
 - Tehlikeler ve hatalara karşı uyarılar bulunmalıdır.
 - Yanlış yapmayı engelleyici düzenekler ve sistem sağlanmalıdır.
 - Özellikle dikkat gerektiren işlerde bilinçsiz hareketler cesaretlendirilmemelidir.
- 6) Düşük Fiziksel Çaba; Tasarım, en az yorulma ile etkin ve rahat olarak kullanılmalıdır.
 - Kullanıcı bireylerin doğal vücut pozisyonlarının korunması sağlanmalıdır.
 - Akla uygun işletim gücü kullanılmalıdır.
 - Tekrar eden hareketler en aza indirgenmelidir.
 - Sürekli fiziksel çaba en aza indirgenmelidir.
- 7) Yaklaşım ve Kullanım İçin Yer ve Boyut; Tasarım, kullanıcısının bedensel boyutu, duruşu ve hareketinden bağımsız olarak yaklaşım, uzanım, çalıştırma ve kullanım için uygun boyutlar ve yer sağlanmalıdır.
 - Oturan ya da ayaktaki kullanıcı için önemli elemanlara açık görsel bakış sağlanmalıdır.
 - Oturan ya da ayaktaki kullanıcı için tüm elemanlara uzanımı kolay hale getirmelidir.
 - Tasarım, el ve tutma boyutlarındaki zenginliği barındırmalıdır.
 - Yardımcı araçların kullanımı ya da kişisel yardım için gerekli alan sağlanmalıdır.

3. Sayısal Uygulama İçin Seçilen Şehit Şendoğan Topçu İlkokulu

Bu makalede sayısal uygulaması için Şehit Şendoğan Topçu ilkokulu seçilmiştir. Çünkü söz konusu okul binasında asansör bulunmadığı ve yapının henüz ekonomik ömrünü tamamlamadığı görülmektedir. Bu amaçla öncelikle Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun mevcut durumu belirlemiş ve kat krokileri çizilmiştir. Daha sonra bu çalışma da incelenen söz konusu okul binasındaki bedensel engelli bireylerin ihtiyaçlarına cevap verebilecek fiziksel mekân ve elemanları başta “TS 9111 özürli insanların ikamet edeceği binaların düzenlenmesi kuralları” standardı (TS-9111, 2011) olmak üzere çeşitli kurum ve kuruluşlar tarafından yayımlanmış olan standartlar göz önünde alınarak değerlendirilmiştir (bkz. Çizelge 1). Sayısal uygulama için seçilen Şehit Şendoğan Topçu ilkokulu kat krokileri ve bina görünüşleri sırasıyla Şekil 1 ve 2’de verilmektedir. Ayrıca Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun Sta4-CAD programıyla yapısal çözümlemesi için oluşturulan görünüşleri Şekil 3’de verilmektedir.

Çizelge 1. Şehit Şendoğan Topçu ilkokulundaki engelli bireyler için yapı öğelerinin durumu ve TSE-9111 Standardına göre mevcut yapı öğelerinin uygunluğu

Okul Binası	Yapım Yılı	Güçlendirme yapılmış	Bina girişleri için rampa	Binadaki merdivenler	Binadaki asansörler	Bina girişleri için rampa Standardı 90cm	Binadaki merdivenler Standardı 180cm	Binadaki asansörler Standardı 110x140cm
Şehit Şendoğan Topçu ilkokulu	1984	X	X	✓	X	Yok	175	Yok



Şekil 1. Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun kat krokileri

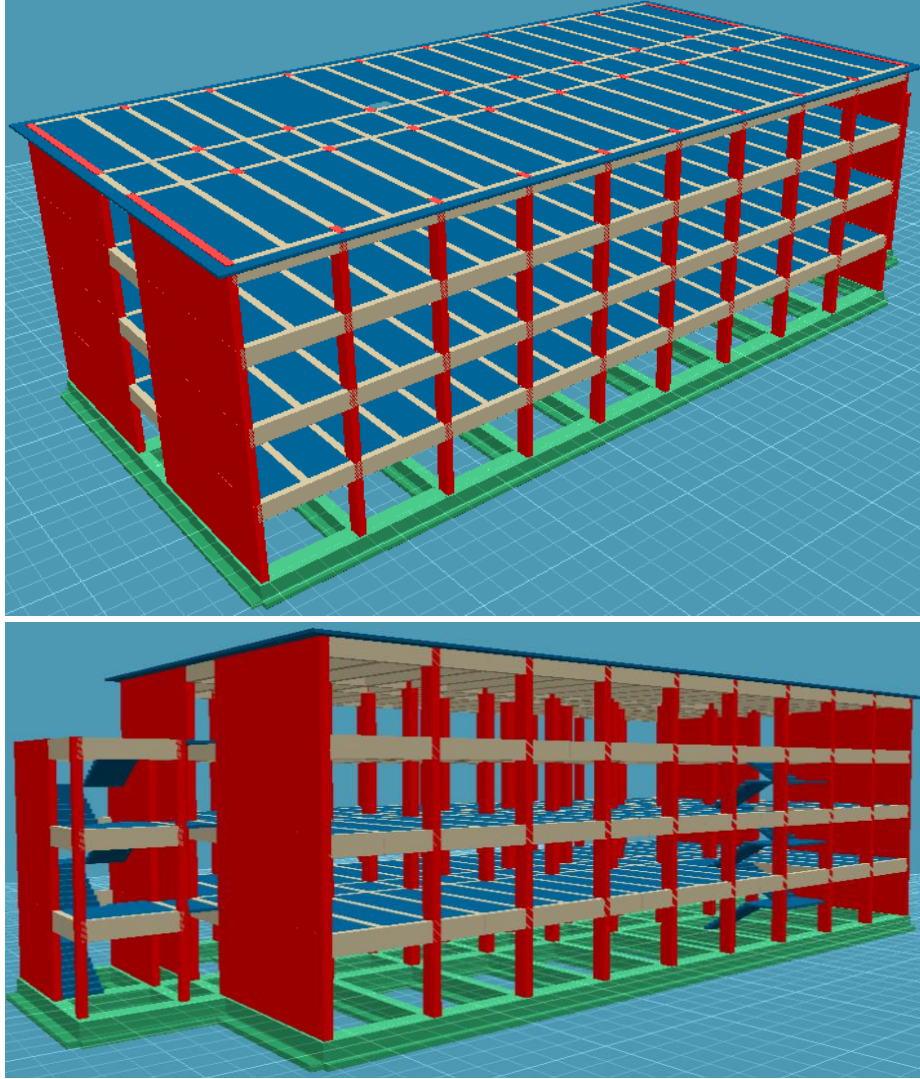


Şekil 2. Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun cephelerinden ve iç kısmından bazı görünümeler

Bu çizelge ve şekillerden 1984 yılında yapılan Şehit Şendoğan Topçu ilkokulu zemin dahil toplam 4 kattan oluştuğu görülmektedir. Söz konusu okul binasına herhangi bir güçlendirme işlemi yapılmamıştır. Ayrıca okul binasında engelli bireylerin kullanabileceği asansör ve rampa bulunmadığı görülmektedir (Ceylan, 2017).

Bugün yürürlükte bulunan “*Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*” yönetmeliğine göre (TS-500, 2000) Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun C16 beton ve S220 çelik sınıflarına göre tasarlandığı görülmektedir. Ayrıca yürürlükte bulunan “*Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkındaki Yönetmeliğe*” göre Şehit Şendoğan Topçu ilkokulu 1. derece deprem bölgesinde inşa edildiği dolayısıyla da etkin yer ivmesi katsayısının 0,4 olarak alındığı görülmektedir (TDY, 2007). Şehit Şendoğan Topçu

ilkokulunun zemin etüd raporuna göre okul binasının Türkiye Deprem Yönetmeliğinde tanımlanan Z2 yerel zemin sınıfının C grubunda yer aldığı belirlenmiştir. Şehit Şendoğan Topçu ilkokuluna ilişkin daha önceki yapısal analizlerde dikkate alınan diğer parametreler de Çizelge 2’de özetlenmektedir.

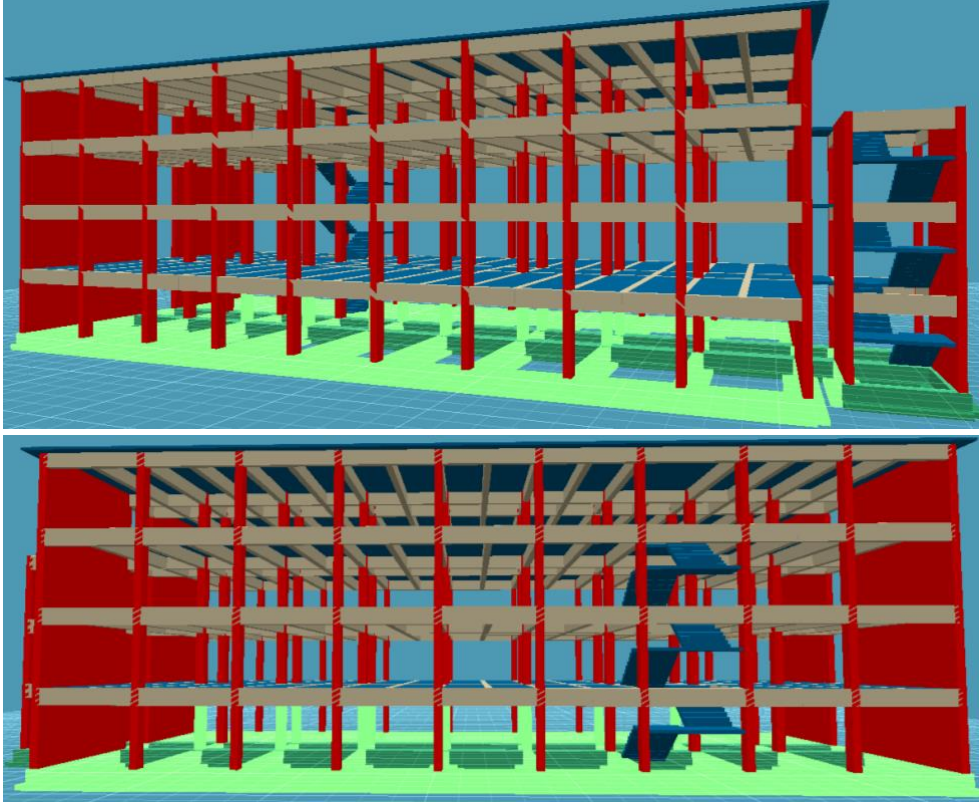


Şekil 3. Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun Sta4-CAD programıyla oluşturulan modelinin cephelerinden bazı görünümüler

Çizelge 2. Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun diğer proje parametreleri

Deprem bölgesi	1
Etkin yer ivmesi katsayısı (A_0)	0,4
Bina önem katsayısı (I)	1
Taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R)	4
Hareketli yük katılım katsayısı	0,6
Z2 Yerel zemin sınıfı için spektrum karakteristik periyotları (s)	$T_A=0,15 \quad T_B=0,40$
Z2 Yerel zemin sınıfı için temel zemini emniyet gerilmesi (kN/m^2)	125
Z2-Yerel zemin sınıfı için temel zemini yatak katsayısı (kN/m^3)	20000
Döşeme kalınlıkları (cm)	12
Kirişlerin en kesit boyutları (cm)	30x70 ve 25x70
Hareketli yük (kN/m^2)	3,5
Kat sayısı (Z+3)	4
Beton sınıfı	C16 ($f_{ck}=16$ MPa)
C16 Betonun elastisite modülü (MPa)	27000
Çelik sınıfı	S220 ($f_{yk}=220$ MPa)
S220 Çeliğinin elastisite modülü (MPa)	200000

Bu çalışmada Milli Eğitime bağlı Karabük merkezdeki ilk ve orta öğretim okul binalarının bedensel engelli bireylerin ulaşılabilirliği için yapılacak iyileştirme (asansör ilavesi gibi) işleminin sayısal uygulamada örnek olarak seçilen Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun mevcut durumu matris deplasman yöntemini kullanan Sta4-CAD programıyla, TDY-2007’de önerilen Z2 yerel zemin sınıfı için, depremsiz durumda gerçekleştirilen yapısal çözümlerinden elde edilen yetersiz yapısal elemanlarının görünümü Şekil 4’de verilmektedir. Bu şekilde Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun mevcut beton ve donatı (demir) sınıfları için özellikle zemin kolonlarının çoğunun yetersiz olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle zemin kolonlarının kullanım dışı kalmasıyla binanın tamamının kullanım dışı kalacağı açıktır. Bu sonuç Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun mevcut durumuyla emniyetsiz olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun yetersiz olan yapısal elemanlarının güçlendirilmesi gerekliliği ortadadır. Durum böyle olunca yetersiz olan zemin kat kolonlarının mantolama tekniğiyle ve yetersiz temel (iki doğrultuda sürekli temel) sistemine plak (kirişsiz radye) temel sistemi ilave edilerek okul binası güvenli duruma getirilmiştir.



Şekil 4. Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun depremsiz yapısal çözümlerinden oluşan yetersiz olan elemanlarından görüntüler

Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun depremsiz durumdaki yetersiz olan yapısal elemanlarının güçlendirilmesiyle oluşturulmuş bina modelinin TDY-2007’deki Z2 yerel zemin sınıfı için önerilen tasarım spektrumuna göre, depremlilikte Sta4-CAD programıyla gerçekleştirilen yapısal çözümlerinden elde edilen yetersiz yapısal elemanlarının görünümü Şekil 5’de verilmektedir. Bu şekillerden de Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun deprem etkisi altında güçlendirme yapılmamış özellikle zemin kat ve 1. kat kolonlarının yetersiz olduğu görülmektedir. Bu sonuçta Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun deprem emniyetinin olmadığını ortaya koymaktadır. Durum böyle olunca Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun yetersiz olan zemin kat ve 1. kat kolonları mantolama tekniğiyle güçlendirilmiştir. Diğer taraftan bu güçlendirme işlemleriyle birlikte Şehit Şendoğan Topçu ilkokuluna engelli bireylerin ulaşılabilirliği için bir asansör de ilave edilmiştir.

Burada bugün yürürlükte bulunan “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları” yönetmeliğine göre okul binasına ilave edilen asansör ve mantolama ile güçlendirmede kullanılan beton sınıfının C30 ($f_{ck}=30$ MPa) ve çelik sınıfının ise S420 ($f_{yk}=420$ MPa) olduğunu belirtmek uygun olacaktır.

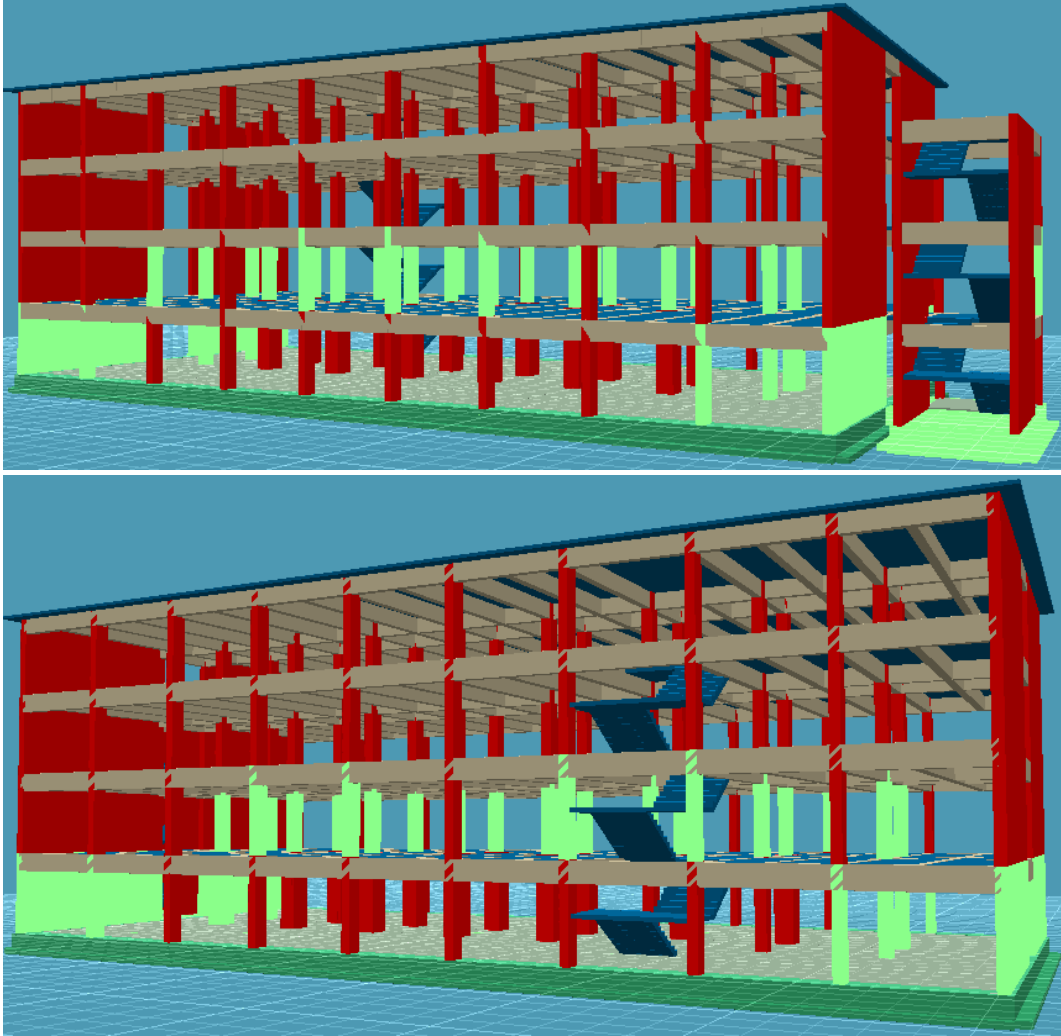
Engelli bireylerin ulaşılabilirliği için ilave edilen asansör ve yetersiz olan yapısal elemanlarına güçlendirme işlemi uygulanmış Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun zemin kat planı ve bina görünüşleri Şekil 6’da ve güçlendirme işlemi uygulanmış temel sistemi ise Şekil 7’de verilmektedir. Bu şekillerden Şehit Şendoğan Topçu ilkokuluna engelli bireylerin ulaşılabilirliği için plan üzerinde farklı konumlarda asansör ilave edilebileceği, ancak okul binasının mevcut durumda emniyetinin olmadığı, gerekli emniyeti sağlamak için oldukça kapsamlı çalışmaların yapılması gerektiği görülmektedir.

Bu çalışmanın sayısal uygulamasında dikkate alınan Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun Sta4-CAD programı yardımıyla, TDY’de önerilen Z2 yerel zemin sınıfı için, gerçekleştirilen güçlendirilmiş depremlilik ve asansör ilave edilmiş modellerinin yapısal çözümlerinden elde edilen durumlar taban kesme kuvvetleri ve söz konusu modellere ilişkin 1. doğal titreşim periyotları (T1) Çizelge 3’de verilmektedir. Bu çizelgeden güçlendirilmiş ve asansör ilave edilmiş okul modelinin periyot değerinin güçlendirilmiş

ancak asansör ilave edilmemiş okul modeline göre azaldığı görülmektedir. Diğer taraftan güçlendirilmiş ve asansör ilave edilmiş okul modelinin x ve y doğrultularında elde edilen taban kesme kuvvetlerinin arasındaki farkın azaldığı görülmüştür. Bu bulgular da güçlendirilmiş ve asansör ilave edilmiş okul modelinin performansının daha iyi olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 3. Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun depremler ve güçlendirme uygulanmış ve asansör ilave edilmiş modellerinin maksimum taban kesme kuvvetleri ve doğal titreşim periyotları değerleri

Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun bina modelleri	Z2 yerel zemin sınıfına göre taban kesme kuvvetleri		Periyot (T1)
	x doğrultusu	y doğrultusu	
Depremler model	629,42	1748,58	1,43
Güçlendirme uygulanmış model	712,25	1863,17	1,33
Güçlendirme uygulanmış ve asansör ilave edilmiş model	822,74	1369,07	1,14

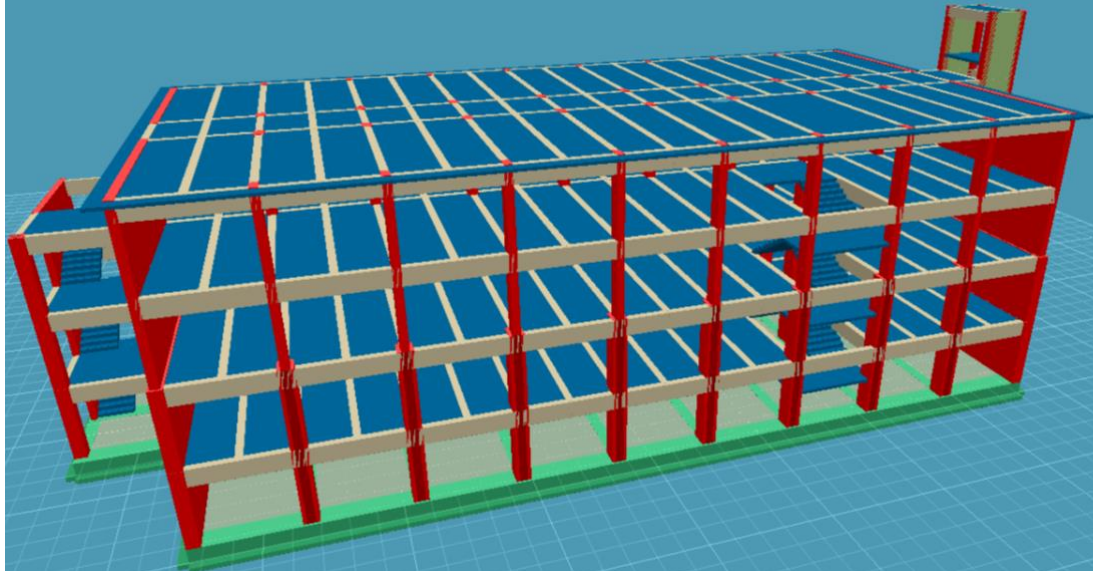
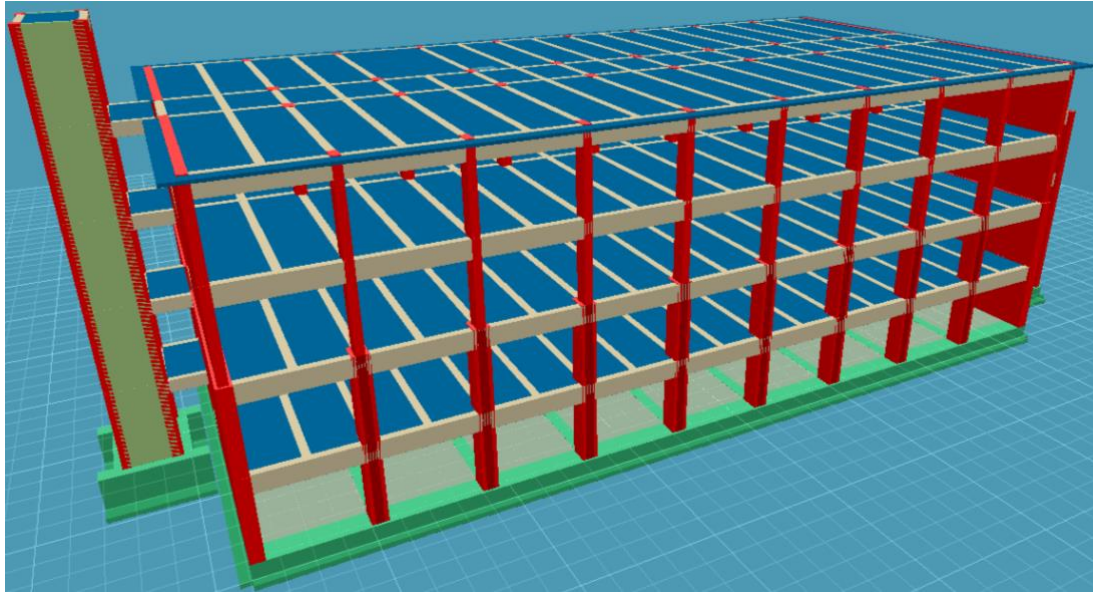
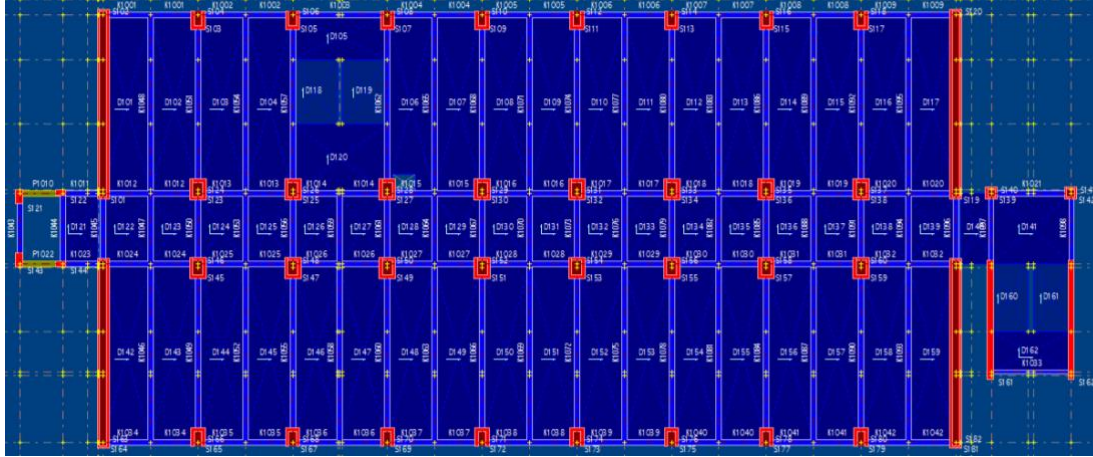


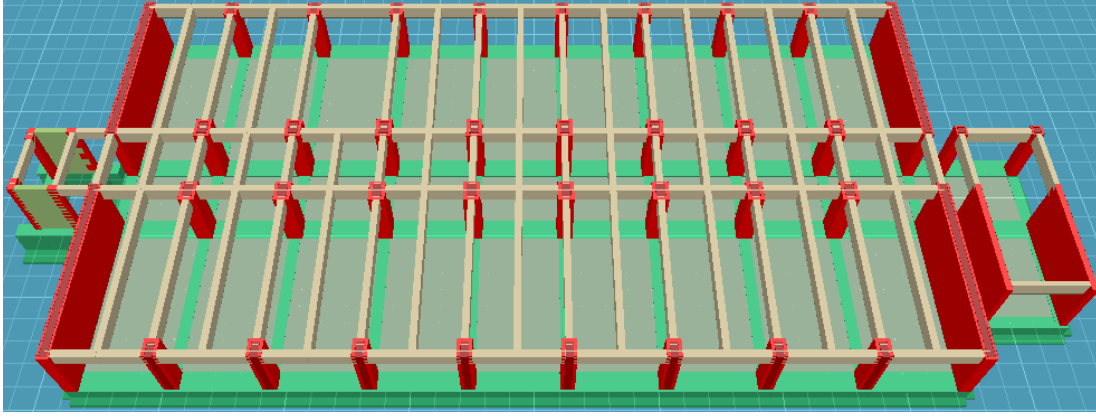
Şekil 5. Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun depremler yapısal çözümlemesinden oluşan yetersiz olan elemanlarından görüntüler

2007 Türkiye Deprem Yönetmeliğine göre okul binalarının performans hedefleri Çizelge 4'de verilmektedir. Bu çizelgeden de görüleceği üzere okul binalarının depremler sonrası hemen kullanım (HK) ve can güvenliği (CG) koşullarının sağlanması gerekmektedir. Türkiye Deprem yönetmeliğine göre bu çizelgedeki gibi belirlenen hedef performans (başarıma), okul gibi yapılarda 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem düzeyi kullanılmaktadır. Bu nedenle hedef deprem düzeyine göre depremin ivme spektrumu katsayısı değişmektedir. Diğer bir ifadeyle depremlerden hemen sonra kullanılması gereken binalarda; 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem düzeyinde hemen kullanımı sağlamalı ve 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem düzeyinde de can güvenliğini sağlamalıdır.

Çizelge 4. TDY'ye göre farklı deprem düzeyleri için okul binalarında öngörülen performans hedefleri

Binanın Kullanım Türü	Deprem Aşılma Olasılığı		
	50 yılda %50	50 yılda %10	50 yılda %2
İnsanların Uzun Süreli ve Yoğun Olarak Bulunduğu Binalar: <i>Okullar, yatakhaneler, yurtlar, pansiyonlar, askeri kışlalar, cezaevleri, müzeler, vb.</i>	–	HK	CG

**Şekil 6.** Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun yetersiz olan yapısal elemanlarına uygulanan güçlendirilme işlemi ve engelli bireylerin ulaşılabilirliği için ilave edilen asansörle birlikte planı ve bazı görünüşleri



Şekil 7. Şehit Şendoğan Topçu ilkokulu nun temel sistemine uygulanan güçlendirilme işlemi ve engelli bireylerin ulaşılabilirliği için ilave edilen asansörün temelinden bir görünüm

Burada hedef performans olarak belirlenmiş olan can güvenliği performansının sağlanmaması durumunda, can güvenliği performansı sağlanuncaya kadar güçlendirmeye işlemine devam edilmesi gerektiğini belirtmek yararlı olacaktır.

Şehit Şendoğan Topçu ilkokulu nun *Türkiye Deprem Yönetmeliğine* göre 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem düzeyinde can güvenliği dikkate alınarak gerçekleştirilen yapısal çözümlemeden elde edilen binanın yatay yük taşıma kapasiteleri Çizelge 5’de verilmektedir. Bu çizelgeden de okul binasının x ve y doğrultularında yatay yük taşıma kapasitelerinin önemli derecede arttığı görülmektedir. Elde edilen bu bulgu da Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun mevcut durumuyla yeterli deprem emniyetine sahip olmadığını göstermektedir.

Çizelge 5. Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun can güvenliğine göre gerçekleştirilen yapısal çözümlemeden elde edilen yatay yük taşıma kapasite değerleri

Kat No	x doğrultusu			y doğrultusu		
	Deprem Yüğü (V_e)	Mevcut Okul (V_r)	Güçlendirilmiş Okul (V_r)	Deprem Yüğü (V_e)	Mevcut Okul (V_r)	Güçlendirilmiş Okul (V_r)
4	324,22	273,66	273,66	790,40	1356,40	1356,40
3	422,49	400,65	400,65	1263,69	1250,83	1259,78
2	551,62	604,27	900,16	1546,23	1077,10	2250,33
1	641,02	674,44	991,03	1676,86	945,55	2356,59

Burada bu hesaplamaların yapısal elemanların hasar düzeyini bulmada kullanıldığını, yatay yük kapasitelerinin binanın güçlendirmesinde öngörü verdiğini ve binadaki kapasite artışının gözlemlendiğini belirtmek uygun olacaktır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada engellilere yönelik tasarım prensipleri ve gerekli mekânsal ölçüleri dikkate alınarak bedensel engelli bireyler için Karabük İl Millî Eğitim Müdürlüğüne bağlı Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun engelliler için ulaşılabilirliği incelenmiştir. Bedensel engelli bireylerin söz konusu okul binasına ulaşılabilirliği için çözüm önerileri sunduğumuz bu çalışmadan elde edilebilen başlıca sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

- Gerçekleştirilen araştırma sonucunda yeni ve eski yapılmış olan Karabük ili ilk ve orta öğretim binalarında tespit edilen sorunların hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Özellikle yeni yapılmış binalarda da aynı sorunların olması tasarımcılar, uygulayıcılar ve denetlimciler tarafından maalesef dikkate alınmayan sürecin göstergesi olarak karşımıza çıkmaktadır.
- Şehit Şendoğan Topçu ilkokulunun güçlendirilmiş ve asansör ilave edilmiş modellerinin yapısal çözümlemelerinden x doğrultusunda %47~49 ve y doğrultusunda %110~149 yatay yük taşıma kapasitelerinin arttığı görülmektedir.
- Ülkemizde son yıllarda önem vermeye başlanan engelli bireylere uygun tasarım ilkeleri her konuda daha çok geliştirilmeli ve bunların uygulamasına dikkat edilmelidir. Diğer bir ifadeyle bir gün herkesin engelli olabileceği gerçeğini unutmadan engelliler için gerekli yasal ve mimari düzenlemeler yapılmalıdır.
- Engellilerin erişilebilirliği açısından yapılacak ek müdahalelerin okul binalarında diğer tasarım ölçütlerini (mekânsal alan gerekliliği gibi) olumsuz etkileyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.
- Gerçekleştirilmiş olan bu çalışmayla yapım yıllarına bakıldığında Karabük İl Millî Eğitim Müdürlüğüne bağlı ilk ve orta öğretim okul binalarının yeterli emniyette olmadığı dolayısıyla da mutlaka takviye edilmesi (güçlendirilmesi) gerektiği ve engelliler için ulaşılabilirliği ile ilgili önemli sorunların olduğu görülmektedir.

Teşekkürler

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimince desteklenmiştir. Proje Kod No: KBU-BAP-14/1-YL-021.

Referanslar

222 Sayılı kanun, (1961). İlköğretim ve eğitim kanunu, 10705 Sayılı Resmî Gazete.

572 Sayılı KHK, (1997). 572 Sayılı bazı kanunlarda değişiklik yapılmasına ilişkin kanun hükmünde kararname, 23011 Sayılı Resmî Gazete.

2709 Sayılı kanun, (1982). Türkiye Cumhuriyeti Anayasası, 17863 Mükerrer Sayılı Resmî Gazete.

5378 Sayılı kanun, (2005). Engelliler hakkında kanun, 25868 Sayılı Resmî Gazete.

Ceylan, C.C, (2017). Engelsiz erişim açısından Karabük ilinde bulunan ilk ve orta öğretim okul binalarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversite, Karabük, Türkiye.

Gürsoy, Ş. Ceylan, C.C. ve Turcan, Y. (2017). Accessibility Condition of Primary and Secondary School Buildings for Disabled People in the City of Karabük, *J. Int. Environmental Application & Science*, 12(3), 238-243.

Sta4-CAD, (2014). Structural analysis for computer aided design, ver.13.1. www.sta.com.tr

TDY-2007, (2007). Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara/Türkiye.
TS-500, (2000). Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara/Türkiye.

TS-500, (2000). Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara/Türkiye.

TS-9111, (2011). Özürlüler ve hareket kısıtlılığı bulunan kişiler için binalarda ulaşılabilirlik gerekleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara/Türkiye.



Polyester Bağlayıcı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Mechanical Properties of Polyester Based Composites

Özer Sevim¹

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

Başvuru/Received: 11/12/2018

Kabul/Accepted: 24/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Bu çalışmada bağlayıcı olarak polyester, agrega olarak ponza ve katkı malzemesi olarak uçucu kül kullanılarak polyester bağlayıcı polimer kompozitler üretilmiştir. Bağlayıcı malzeme olarak çimento yerine polyester kullanılması ile polyester esaslı çimentosuz kompozitler üretilmiştir. 40×40×160 mm ebatlarında prizmatik numuneler üretilerek kompozitlerin basınç ve eğilme dayanımları test edilmiştir. EN 196-1'e göre maksimum basınç ve eğilme dayanımları sırasıyla 45,69 MPa ve 8,49 MPa elde edilmiştir. Kontrol numuneye göre basınç ve eğilme dayanımları sırasıyla %32,2 ve %27,9 oranında artmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Ponza agrega, Polimer kompozit, Polyester bağlayıcı kompozit, Uçucu kül”

Abstract

In this study, polyester-based polymer composites were produced by using polyester as binder, pumice as aggregate and fly ash as additive material. Polyester-based composites were produced by using polyester instead of cement as binder material. The compressive and flexural strengths of the composites were tested by using prismatic samples of 40×40×160 mm. The maximum compressive and flexural strengths for EN 196-1 were 45.69 MPa and 8.49 MPa, respectively. Compressive and flexural strengths increased by 32.2% and 27.9%, respectively, compared to the control sample.

Key Words

“Pumice aggregate, Polymer composite, Polyester based composites, Fly ash”

1. Giriş

Son yıllarda, polyesterler olağanüstü mekanik özellikler sağlamak için reçine sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Xu vd., 2014; Şimşek ve Uygunoğlu, 2018). Bu özellik polyester reçinelerin inşaat mühendisliği alanında kullanılması için araştırmaları çekici hale getirmiştir (Heidari vd., 2014; Zhao vd., 2016). Silis dumanı ve uçucu kül gibi puzolanlar ve çimento, beton kompozitlerin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için polyester reçine içine dahil edilmiştir (Seleem, 2006). Yapılan bu çalışmada ise polyester, hafif agrega olan ponza agregası ve uçucu kül ile kullanılmıştır.

Ponza, lavın katılaşması sırasında gazların salınmasıyla oluşan volkanik kökenli doğal bir malzemedir. Ponzaların yapısı, yanardağlardan akan erimiş lav içerisindeki gazların soğuması durumunda kabarcıkların veya hava boşluklarının oluşumu ile meydana gelir. Bu boşluklar bazen birbirine paralel bazen ise birbirleri ile bağlantılıdır. Volkanik ponza dünyanın birçok yerinde hafif beton üretiminde agrega olarak kullanılmaktadır (Uysal vd., 2004; Yasar vd., 2003; Hossain, 2003; Hossain, 2004; Hossai vd., 2011). İşlenmiş yapay agregaların yerine doğal hafif agregaların kullanılması, beton maliyetleri önemli ölçüde azaltabilmektedir (Hossai vd., 2011).

Dünyada her yıl 19,6 milyon ton volkanik ponza (VP) çıkarılıyor ve Türkiye yılda 4,2 Milyon ton üretimiyle hâkim üretici konumundadır (Crangle, 2011). Diğer önde gelen ülkeler ise İtalya, Şili, Ekvador, Etiyopya, Fransa, Almanya, Yunanistan, İspanya ve ABD'dir. Ponza normal olarak hafif yapı blokları, beton ve çeşitli yapı ürünlerinde agrega olarak kullanılır (Crangle, 2011; Grasser vd., 1990; Yeginobali vd., 1998; Litvan, 1985). Son birkaç yıldır çimento ve beton üretiminde volkanik kül ve ponza kullanımı üzerine araştırmalar yapılmıştır (Hossain, 2004; Hossain ve Lachemi, 2006; Khandaker ve Hossain, 2005a; Khandaker ve Hossain, 2005b).

Bu çalışmada ponza agregasına ek olarak tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan ve çimento gibi bir başka bağlayıcı ile bağlayıcılık özelliği kazanan uçucu kül kullanılmıştır. Yapay bir puzolan olan uçucu küller çimento yerine ikame edilerek kullanılmaktadır. Kömürle çalışan termik santrallerde kömürün yanması sonucu meydana gelen atık kül taneciklerinin bacalardaki elektro-filtreler yardımıyla tutulması ile elde edilen üründür. Uçucu küllerin önemli bir kısmı SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'den meydana gelmektedir (Neville, 1981; Aruntaş, 2006; Sevim ve Demir, 2019a; Sevim ve Demir, 2019b; Demir vd., 2018). Uçucu küller çimentoda katkı malzemesi, ikame malzemesi ve hammadde olarak kullanılmaktadır (Zhao vd., 2015; Bagheri vd., 2013; Shaikh ve Supit, 2015)

Bilimsel literatürde yer alan yukarıdaki bilgiler ışığında, ponza agregası ile üretilen polyester bağlayıcı kompozitlerin eksikliği görülmüştür. Literatürdeki eksikliği dikkate alınarak, bu çalışmada polyester bağlayıcı ve ponza agregası ile çimentosuz kompozitler üretilmiştir. Polyester bağlayıcı kompozitler birçok gelişmiş ülkede yeni bir malzemedir ve hala araştırılmaktadır (Haddad vd., 1983; Heidari vd., 2014; Zhao vd., 2016). Yukarıdaki bilgilerde göz önüne alındığında, hafif ponza agregası, polyester ve uçucu kül içeren kompozitlerin tasarımları yapılmıştır. Üretilen polyester bağlayıcı kompozitlerin 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları incelenmiştir.

2. Deneysel Program

2.1. Materyal

2.1.1. Ponza

Yapılan çalışmada birim hacim ağırlığı 710 kg/m^3 , ısı iletkenlik katsayısı $0,015 \text{ W/mK}$ ve ses yalıtımı 50 dB olan ponza agregası kullanılmıştır. Ponza agregası hafif agrega olarak kullanılmış ve polyester bağlayıcı hafif agregalı kompozitlerin üretilmesini sağlamıştır.

2.1.2. Uçucu Kül

Çalışmada Çayırhan termik santralinde üretilen $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den az ve CaO oranı %10'dan fazla olan C sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 1'de sunulmuştur. Kullanılan uçucu kül fabrikadan çıktığı şekilde öğütülmeden direk kullanılmıştır.

Tablo 1. Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Birleşim (%)	Uçucu Kül
SiO ₂	48,49
Al ₂ O ₃	11,52
Fe ₂ O ₃	8,71
CaO	14,53
MgO	7,24
SO ₃	5,51
Na ₂ O	1,01
K ₂ O	2,23
Fiziksel Özellikler	
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	2760

2.1.3. Polyester

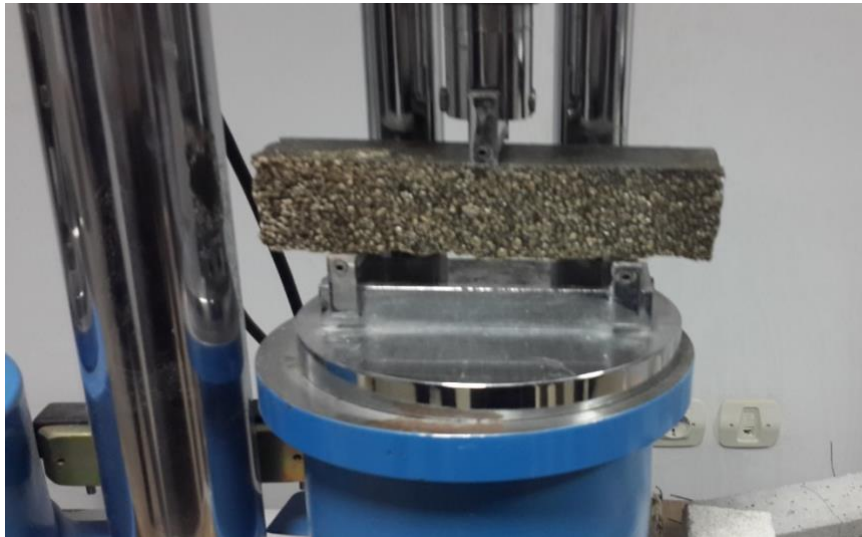
Polyesterler genelde lifler halinde veya granüler halde özellikle otomotiv endüstrisi kumaşlarında, giyim endüstrisinde kullanılmaktadır (Wang vd., 2016; Lin vd., 2014; Carosio vd., 2014; Zhao vd., 2014). Bu çalışmada özgül ağırlığı 1132 kg/m³ olan sıvı polyester, çimento yerine bağlayıcı bileşen olarak kullanılmıştır. Polyester sertleştiricisi olarak iki adet malzeme kullanılmıştır. Bunlar mor (kobalt) ve şeffaf (mekperoksit) olarak isimlendirilmiştir.

2.1.4. Strafor köpük

Yapılan bu çalışmada bazı karışımlarda strafor köpük kullanılmıştır. Strafor köpükler bünyelerindeki granüller sayesinde çok iyi yalıtım özelliği gösterir. Bu nedenle ilave izolasyon malzemesine ihtiyaç göstermez. Kullanılan strafor köpüğün yoğunluğu 320 kg/m³, ısı iletkenlik katsayısı 0,065 W/mK'dir.

2.2. Metot

Karışım hesabı kontrol numune TS 802'ye göre yapılmıştır (TS 802, 2016), karışım hesabında dayanım sınıfı C 25 olarak alınmıştır. Yapılan çalışma için kontrol numune haricinde 5 adet deney numunesi EN 196-1'e göre üretilmiştir (TS EN 196-1, 2016). Üretilen 5 numune için karışımlar Tablo 2'de verilmiştir. Üretilen kompozitler için bağlayıcı olarak çimento yerine polyester kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerin 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları, EN 196-1'e göre belirlenmiştir. Hazırlanan numuneler deney gününe kadar 20±2°C'de kirece doymuş su içerisinde bekletilerek standart kür işlemi uygulanmıştır. Eğilme dayanımı için suda bekletilen kompozitler kür havuzundan çıkarılarak eğilme presi ile EN 196-1'e uygun (50±10) N/s yükleme hızında 3 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 1).



Şekil 1. Kompozitlerin 3 noktalı eğilme dayanım testleri

40×40×160 mm boyutunda prizmatik çubuklar, her bir değer için üç adet kırılarak ve üç adet sonucun aritmetik ortalaması alınarak değerlendirme yapılmıştır. Eğilme dayanımı sonucu altı adet 40×40×40 mm boyutundaki kompozitler basınç presi ile basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Basınç dayanımı cihazı deney için uygun kapasitede ve EN 196-1'e uygun (2400±200) N/s yükleme hızında ayarlanmıştır. Basınç dayanımı deneyinin sonucu, 3 prizmatik takımdan elde edilen 6 adet çimento harcı basınç deneyi sonucunun aritmetik ortalaması olarak ifade edilmiştir. 6 adet sonuç içerisinde biri ortalamadan ± %10'dan fazla farklılık gösterdiği durumda bu sonuç atılarak, geri kalan 5 sonucun ortalaması alınmıştır.

Tablo 2. Polyester bağlayıcılı kompozitlerin karışım miktarları

Karışım No	Ponza (g)	Polyester (g)	Uçucu Kül (g)	Katılaştırıcılar		Köpük (dm ³)
				Mor (ml) / Şeffaf (ml)		
1	625,0	250,0	-	-	-	-
2	500,0	250,0	250,0	-	-	-
3	500,0	250,0	250,0	0,50	1,30	-
4	406,4	406,4	203,2	0,90	2,14	-
5	203,2	203,2	101,6	0,45	1,07	0,5

3. Deneysel Bulgular

Bu çalışma kapsamında, Tablo 2'de karışım miktarları verilen kontrol numune haricinde 5 farklı polyester bağlayıcılı kompozit serisi için deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Bu 5 farklı deneysel çalışma için polyester, bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Polyester katılaştırıcısı, uçucu kül ve köpük ise her karışım için farklı oranlarda karıştırılarak 1 dm³'lük karışımlar hazırlanmıştır. Polyester bağlayıcılı kompozitlerden (Şekil 2) elde edilen basınç ve eğilme dayanımları Tablo 3'de verilmiştir.



Şekil 2. Polyester bağlayıcılı kompozitlerin kalıplanması

Tablo 3. Polyester bağlayıcılı kompozitlerin basınç dayanımları

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
Kontrol	34,56	6,64
1	-	-
2	-	-
3	42,72	7,66
4	45,69	8,49
5	9,75	1,80

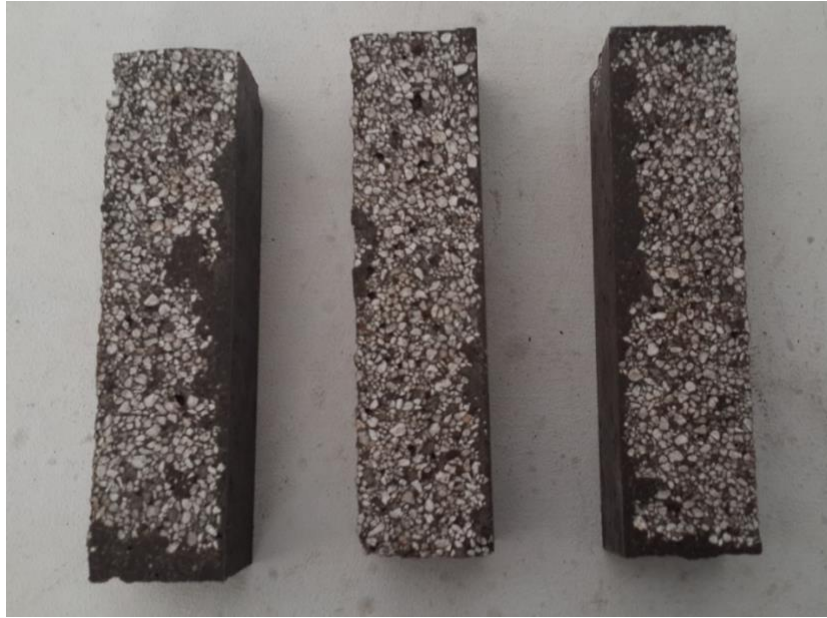
Karışım 1'de katılaştırıcı ve uçucu kül kullanılmamıştır. 40×40×160 mm prizmatik kalıplarda bekletilen karışım 1 numuneleri 28 günün sonunda dayanım göstermemiştir. Karışım 1 göz önüne alınarak işlenebilirliği artırması için ponza agregası azaltılarak uçucu kül kullanılmıştır. Karışım 2 numunelerinin, 28 gün sonunda prizini tam alamadığı görülmüştür.

Karışım 1 ve Karışım 2'nin prizini tam alamayıp bağlayıcılık kazanamadığından dolayı Karışım 3 ile birlikte polyester katılaştırıcısı kullanılmıştır. Karışım 3'de polyester katılaştırıcısı 1,8 (0,5+1,3) ml Karışım 4'de ise 3,04 (0,9+2,14) ml kullanılmıştır. Şekil 3'de gösterilen Karışım 4'de polyester bağlayıcılı kompozitin katılaştırıcı derişimi daha fazla kullanılmıştır. Katılaştırma derişimi daha fazla olan karışım 4'de daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.



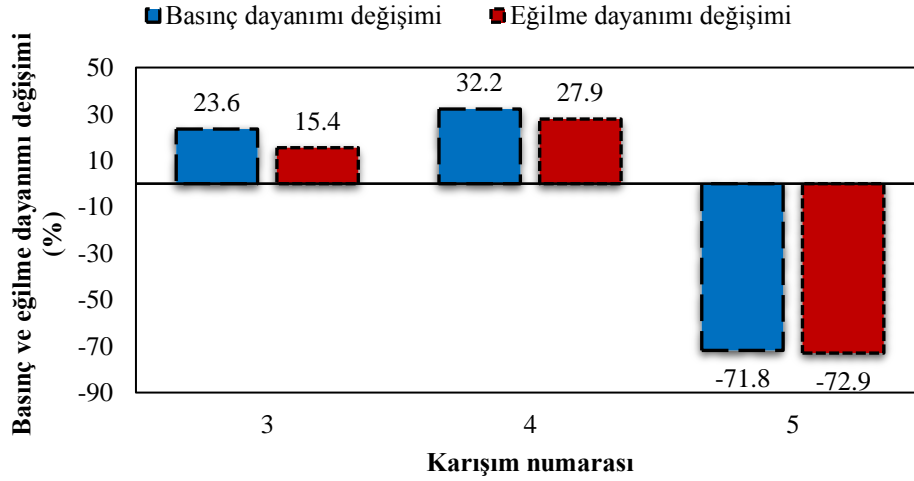
Şekil 3. 4 numaralı polyester bağlayıcılı kompozitler

Şekil 4’de gösterilen Karışım 5’de ise daha hafif bir kompozit elde edebilmek için köpük kullanılarak basınç ve eğilme dayanımlarının elde edilip edilmediğine bakılmış ve üretilen hafif kompozitlerde kayda değer bir basınç dayanımı elde edilmiştir.



Şekil 4. 5 numaralı polyester bağlayıcılı kompozitler

Tablo 3’ de görüldüğü gibi Karışım 1 ve Karışım 2 numunelerinde mekanik dayanımlar elde edilememiştir. Karışım 3 numunesinin basınç ve eğilme dayanımları 42,72 MPa ve 7,66 MPa elde edilmiş ve kontrol numuneye göre %23,6 ve %15,4 oranında artmıştır. Karışım 4’de polyester katılaştırıcının derişiminin artması ile basınç ve eğilme dayanımı 45,69 MPa ve 8,49 MPa elde edilmiştir ve kontrol numuneye göre %32,2 ve %27,9 oranında artmıştır. Karışım 5’de polyester ve ponza oranı azaltılarak hafif kompozit üretimi için çalışma yapılmış ve basınç ve eğilme dayanımları 9,75 MPa ve 1,80 MPa elde edilmiştir. Karışım 5 basınç ve eğilme dayanımları kontrol numuneye göre %71,8 ve %72,9 oranında azalmıştır. Karışım numunelerinin kontrol numuneye göre basınç ve eğilme dayanımı değişimleri Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Polyester bağlayıcılı kompozitlerin basınç dayanımı değişimi

4. Sonuçlar

Çalışma kapsamında hafif ponza agregalı ve 5 farklı karışımda üretilen polyester bağlayıcılı kompozitlerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bulunan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Karışım 4’de verilen polyester bağlayıcılı kompozitin en yüksek basınç ve eğilme dayanımları sırasıyla 45,69 MPa ve 8,49 MPa olarak belirlenmiştir. Çimento bağlayıcı içeren normal kontrol kompozitlere göre basınç ve eğilme dayanımları %32,2 ve %27,9 oranında artmıştır.
- Polyester bağlayıcı içeren fakat katılaştırıcı içermeyen numunelerde basınç ve eğilme dayanımı elde edilememiştir.
- Katılaştırıcı derişiminin yükselmesi kompozit mekanik özelliklerini artırmıştır.
- Yüksek basınç dayanımı nedeniyle normal beton yerine dış saha uygulamalarında kullanılabilirliği gösterilmiştir.
- Çimento üretiminde ortaya çıkan yüksek CO₂ miktarından dolayı, bağlayıcı olarak çimento yerine polyester kullanılması ile çimentonun çevreye verdiği zarar ortadan kaldırılarak çevreye olumlu etki sağlanacaktır.
- Polyester bağlayıcılı kompozitlerin köpük ile birlikte kullanılması, kompozitin kendi ağırlığını taşıyabilecek olmasından ve içerdiği boşlukların fazla olmasından dolayı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir.
- Karışımında değişik agregaların kullanılması ile basınç dayanımı daha yüksek polyester kompozitler elde edilebilir.
- İleriki çalışmalarda polyester bağlayıcılı ve ponza agregalı kompozitlerin durabilite/kalıcılık özellikleri incelenebilir.

Referanslar

Aruntaş, H.Y. (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(1), 2006.

Bagheri, A., Zanganeh, H., Alizadeh, H., Shakerinia, M., & Marian, M.A.S. (2013). Comparing the performance of fine fly ash and silica fume in enhancing the properties of concretes containing fly ash. Construction and building materials, 47, 1402-1408. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.037

Carosio, F., Di Blasio, A., Cuttica, F., Alongi, J. & Malucelli, G. (2014). Flameretardancy of polyester and polyester–cotton blend treated with caseins. Industrial & Engineering Chemistry Research, 53(10): 3917–3923. doi:10.1021/ie404089t

Crangle, R.D. (2011). Pumice and pumicite. US geological survey minerals year book – mineral commodity summaries, 124–25.

Demir, İ., Güzelkücük, S., & Sevim, Ö. (2018). Effects of sulfate on cement mortar with hybrid pozzolan substitution. Engineering Science and Technology, an International Journal, 21(3), 275-283. doi:10.1016/j.jestch.2018.04.009

Grasser, K., & Minke, G. (1990). Building with pumice. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Germany: Eschburn.

Haddad, M.U., Fowler, D.W., & Paul, D.R. (1983). Factors affecting the curing and strength of polymer concrete, ACI Journal, 80(5), 396–402.

- Heidari-Rarani, M., Aliha, M.R.M., Shokrieh, M.M., & Ayatollahi, M.R. (2014). Mechanical durability of an optimized polymer concrete under various thermal cyclic loadings—An experimental study. *Construction and Building Materials*, 64, 308–315. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.031
- Hossain, K.M.A. (2003). Blended cement using volcanic ash and pumice. *Cement and Concrete Research*, 33(10), 1601-1605. doi:10.1016/S0008-8846(03)00127-3
- Hossain, K.M.A. (2004). Properties of volcanic pumice-based cement and lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 283-291. doi:10.1016/j.cemconres.2003.08.004
- Hossain, K.M.A., & Lachemi, M. (2006). Performance of volcanic ash and pumice based blended cement concrete in mixed sulfate environment. *Cement and Concrete Research*, 36(6), 1123-1133. doi:10.1016/j.cemconres.2006.03.010
- Hossain, K.M.A., Ahmed, S., & Lachemi, M. (2011). Light weight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1186-1195. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.036
- Khandaker, M., & Hossain, K.M.A. (2005). Chloride induced corrosion of reinforcement in volcanic ash and pumice based blended concrete. *Cement and Concrete Composites*, 27(3), 381-390. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.02.047
- Khandaker, M., & Hossain, K.M.A. (2005). Volcanic ash and pumice as cement additives: pozzolanic, alkali-silica reaction and autoclave expansion characteristics. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1141-1144. doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.025
- Lin, J.H., Hsieh, J.C., Lin, J.Y., Lin, M.C., & Lou, C.W. (2014). Polyester/low melting point polyester nonwoven fabrics used as soilless culture mediums: effects of the content of low melting point polyester fibers. *Applied Mechanics and Materials*, 457, 49–52. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.457-458.49
- Litvan, G.G. (1985). Further study of particulate admixtures for enhanced freeze–thaw resistance of concrete. *ACI Journal*, 82 (5):724–730.
- Neville, A.M. (1981). *Properties of Concrete*. Longman Scientific and Technical, New York.
- Seleem, H.E.H. (2006). The effect of inorganic fillers on the mechanical and thermal properties of polyester, *Polymer- Plastics Technology and Engineering*, 45(5), 585–590. doi:10.1080/03602550600553754
- Sevim, Ö., & Demir, İ. (2019). Optimization of fly ash particle size distribution for cementitious systems with high compactness. *Construction and Building Materials*, 195, 104-114. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.080
- Sevim, Ö., & Demir, İ. (2019). Physical and permeability properties of cementitious mortars having fly ash with optimized particle size distribution. *Cement and Concrete Composites*, 96, 266-273. doi:10.1016/j.cemconcomp.2018.11.017
- Shaikh, F.U., & Supit, S.W. (2015). Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA). *Construction and building materials*, 82, 192-205. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.068
- Şimşek, B., & Uygunoğlu, T. (2018). Thermal, electrical, mechanical and fluidity properties of polyester-reinforced concrete composites. *Sādhanā*, 43(4), 57. doi:10.1007/s12046-018-0847-5
- TS 802, (2016). *Design of Concrete Mixes*. Turkish Standard Institution, Ankara.
- TS EN 196-1, (2016) *Methods of testing cement—Part 1: Determination of strength*. Turkish Standard Institution, Ankara, 2016.
- Uysal, H., Demirboğa, R., Şahin, R., & Gül, R. (2004). The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(5), 845-848. doi:10.1016/j.cemconres.2003.09.018
- Wang, B., Qian, T., Zhang, Q., Zhan, X., & Chen, F. (2016). Heat resistance and surface properties of polyester resin modified with fluorosilicone. *Surface and Coating Technology*, 304, 31–39. doi:10.1016/j.surfcoat.2016.06.075
- Xu, F., Zhou, M., Chen, J., & Ruan, S. (2014). Mechanical performance evaluation of polyester fiber and SBR latex compound-modified cement concrete road overlay material. *Construction and Building Materials*, 63, 142–149. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.054
- Yasar, E., Atis, C. D., Kilic, A., & Gulsen, H. (2003). Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash. *Materials Letters*, 57(15), 2267-2270. doi:10.1016/S0167-577X(03)00146-0

Yeginobali, A., Sobolev., K.G., Soboleva, S.V., & Tokyay, M. (1998). High strength natural lightweight aggregate concrete with silica fume. ACI SP-178-38, 178, 739–758.

Zhao, J., Wang, D., Wang, X., Liao, S., & Lin, H. (2015). Ultrafine grinding of fly ash with grinding aids: Impact on particle characteristics of ultrafine fly ash and properties of blended cement containing ultrafine fly ash. *Construction and Building Materials*, 78, 250-259. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.025

Zhao, L., Guo, X., Ge, C., Li, Q., Guo, L., Shu, X. & Liu, J. (2016). Investigation of the effectiveness of PC@GO on the reinforcement for cement composites. *Construction and Building Materials*, 113, 470–478. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.090

Zhao, M.L., Li, F.X., Yu, J.Y., & Wang, X.L. (2014). Preparation and characterization of poly (ethyleneterephthalate) copolyesters modified with sodium-5-sulfo-bis-(hydroxyethyl)-isophthalate and poly (ethyleneglycol). *Journal of Applied Polymer Science*, 131(3). doi:10.1002/app.39823



Betonarme Binalarda Kısa Kolon Etkilerinin Araştırılması

Investigation of Short Column Effects in Reinforcement Concrete Buildings

Emrah Meral¹

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 80000 Osmaniye, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 11/11/2018

Kabul/Accepted: 15/06/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Bu çalışmanın amacı kısa kolon davranışının betonarme yapılar üzerindeki etkilerinin doğrusal elastik olmayan zaman tanım alanında analizlerle belirlenmesidir. Bu sebeple hiçbir düzensizliği bulunmayan 4- ve 7- katlı referans binalar 2007 Deprem Yönetmeliği'ne göre tasarlanmıştır. Daha sonra bu binaların zemin katındaki x yönünde en dış iki aksındaki kolonların net boylarının azaltılmasıyla kısa kolonlu bina modelleri hazırlanmıştır. Bu kapsamda, 3-B bina modellerinin her iki asal doğrultularında 12 adet gerçek deprem ivme kaydıyla toplamda 96 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre yapı elemanlarının hasar seviyeleri belirlenmiştir. Ayrıca yapı sistemi için taban kesme kuvveti, tepe noktası ve görelî kat ötelenme oranı gibi parametreler elde edilmiştir. Kısa kolon etkilerinin belirlenebilmesi için bu değişkenler referans ve kısa kolonlu binalar açısından karşılaştırılmıştır. Değerlendirmelere göre 4- ve 7- katlı kısa kolonlu modellerde zemin kat kolonlarında sırasıyla %40 ve %60 dolayında göçme hasarı tespit edilmiştir. Kısa kolonlu modellerde referans binalarına göre taban kesme kuvveti talepleri fazla olurken deplasman talepleri ise düşük hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Kısa kolon, zaman tanım alanında analiz”

Abstract

The aim of this study is to determine the effects of short column behavior on reinforced concrete structures by nonlinear time history analysis. For this reason, 4- and 7-storey reference buildings with no irregularities are designed per 2007 Earthquake Code. Building models with short column were then prepared by reducing the net length of the columns on the two outer axes in the x direction on the ground storey of these buildings. In this context, a total of 96 analyzes have been carried out with 12 real earthquake acceleration records in both prime directions of 3-D building models. The damage levels of the structural elements were determined according to the results of the analysis. In addition, parameters such as base shear force, roof and interstory drift ratio are obtained for the structure system. In order to determine the short column effects, these variables were compared for reference buildings and buildings with short column. According to the evaluations, 40% and 60% collapse damage were detected in the ground storey columns of the 4- and 7-storey short column models, respectively. In short column models, base shear force demands were higher while displacement demands were low with respect to reference buildings.

Key Words

“Short column, time history analysis”

1. Giriş

Ülkemizde bulunan betonarme yapıların çoğunluğunu orta katlı binalar oluşturmaktadır. Ülkemiz dünyanın en yoğun deprem kuşaklarının birisinde bulunduğundan bu binalar deprem tehlikesi altındadır. Depremler yapılarda çok farklı hasar türlerine yol açabilmektedir. Bu yüzden hasarların sebeplerinin ortaya konması binaların tasarım aşamasında bu hasarların önüne geçilmesini sağlayacaktır. Diğer taraftan, deprem etkileri altında yapıların hasar almasının kaçınılmaz ve öngörüldüğü durumlarda, araştırmacı yapının elemanlarına ait hasar seviyelerini ve bu hasarların hangi bölgelerde oluşacağını doğru bir şekilde belirlerse depremin zararlarını asgari düzeye indirmiş olacaktır. Bundan dolayı deprem riski altındaki binaların davranışının doğru değerlendirilmesi bu binaların deprem performansı açısından oldukça önem arz etmektedir.

Geçmiş depremlerde meydana gelen yapısal hasarlar ve binaların performanslarıyla ilgili literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda yumuşak kat, zayıf kat, kısa kolon, güçlü kiriş-zayıf kolon, kapalı çıkma, yetersiz enine donatı ve düşük beton dayanımı gibi yapısal düzensizlikler ve eksiklikler hasarların temel nedenleri arasında gösterilmiştir (Bayraktar vd., 2013; Inel vd., 2013; Ozmen vd., 2014; Yon vd., 2015). Bu yapısal kusurların içinde bulunan ve mevcut çalışmanın da konusu olan kısa kolon ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalar aşağıda özetlenmiş ve açıklanmıştır.

Özmen (2005), yumuşak kat, kısa kolon ve kapalı çıkma gibi düzensizliklerin orta yükseklikteki betonarme binaların yapı performansları üzerinde etkilerini değerlendirmiştir. Kısa kolon davranışının anlaşılabilmesi için 4- ve 7- katlı üç boyutlu her iki yönde simetrik olan referans binalara zemin katta farklı perde yüksekliği kullanılarak yarım perdeler eklenmiş ve kısa kolonlu modeller oluşturulmuştur. Referans ve kısa kolonlu binaların doğrusal olmayan statik analizlerinden kapasite eğrileri elde edilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Dikkate alınan farklı yarım perde yüksekliğine göre her kısa kolonun gerçek kısa kolon davranışı göstermeyebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Işık (2006), 5-, 8- ve 11 katlı üç boyutlu betonarme yapılarda zemin katta dolgu duvar yüksekliklerini artırarak kısa kolon oluşumunu incelemiştir. Mod birleştirme yöntemi kullanılarak yapılan analizlere göre seçilen bazı kolonlarda duvar yüksekliğine bağlı olarak moment, kesme kuvveti ve yer değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Kolonlardaki moment değişimlerinin birbirlerinden farklı olduğu belirlenmiştir. Çerçevenin boş ve dolu olması durumundaki kesme kuvvetleri arasında çok ciddi bir farkın bulunmadığı, ancak duvarın çerçeveyi tam doldurduğu durum ile bir adım öncesindeki kesme kuvvetleri arasında ciddi farkın olduğu görülmüştür. Yer değiştirme verilerinin ise artan duvar yüksekliği ile azaldığı gözlemlenmiştir.

Mutlu (2007), 3- katlı ve iki boyutlu betonarme bir bina seçerek kısa kolon etkisini araştırmak amacıyla zemin katta kolonlar arasındaki duvarlarda farklı bant pencere boşlukları bırakarak 32 farklı bina modeli oluşturmuştur. Doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri sonucunda binaların zemin katındaki bazı kolonların gerilme dağılımları ve yatay yük-yer değiştirme grafikleri elde edilerek incelenmiştir. Zemin katın tamamen duvarlı ve duvarsız olduğu modeller hariç diğer modellerin tamamında seçilen kolonlarda bant pencerenin olduğu kısımda normal gerilme değerinin artarak bant pencerenin üst bölümünde en büyük değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Zemin kattaki bant pencere alanı ile yapının yatay yük kapasitesinin ters orantılı olarak değiştiği sonucuna varılmıştır.

Yön ve Sayın (2008), kısa kolon etkisini incelemek için kısa kolonlu ve kısa kolonsuz iki boyutlu 7- katlı betonarme yapı modelleri tasarlamışlardır. Kısa kolonlu model, zemin ve 1. katında kısa kolon fiktif çubuklarla oluşturulan dolgu duvarların yüksekliği düşürülerek hazırlanmıştır. Diğer kısa kolonsuz olan modelde ise tüm katlar bölme duvarlı olarak yapılmıştır. Doğrusal statik analizler sonucunda her iki modele ait elemanların hasar durumları belirlenerek kıyaslamalar gerçekleştirilmiştir. Bulunan sonuçlara göre kısa kolonlu modelin zemin ve 1. katındaki tüm kirişlerin göçme durumunda olduğu, diğer kısa kolonsuz modelin aynı katlarında ise sadece birkaç kirişin göçme konumuna ulaştığı, bunun dışındaki tüm kirişlerin ise ileri hasarda kaldığı belirlenmiştir. Zemin ve 1. katın dışındaki tüm katlarda bulunan kirişlerin hasar seviyelerinin ise her iki modelde birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Kolonlarda ise kısa kolonlu modelde bazı kolonlar ileri hasar seviyesine gelirken, kısa kolonsuz modelde aynı kolonlardaki hasar seviyesi belirgin hasarda kalmıştır. Diğer kolonların hasar seviyeleri ise her iki modelde benzer olarak hesaplanmıştır.

Çağatay ve Beklen (2009), dolgu duvarın kısa kolonun kesme kuvvetine etkisini incelemek için açıklıklarına göre tek açıklıktan beş açıklığa kadar değişen tek katlı iki boyutlu modeller hazırlamışlardır. Doğrusal statik analiz kapsamında açıklıkları 5m ve 10m seçilen modellere yatay yük uygulanarak kısa kolonların etrafına kolonlara dik doğrultuda belirli adımlarla duvar eklenmiştir. Analizler sonucunda 10m açıklık için hesaplanan kesme kuvveti değişimlerinin ve artış miktarının 5m açıklığa göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca açıklığın %20'si kadar kolonların yanına dolgu duvar eklendiğinde kesme kuvvetinin %50 ile %80 arasında azalabileceği belirtilmiştir.

Demir vd. (2013), betonarme yapıların en alt katında bulunan perde duvar yüksekliğinin $\frac{1}{4}$ 'ü kadar bırakılan bant pencere boşluklarının sebep olduğu kısa kolon davranışının iyileştirilmesini deneysel olarak araştırmışlardır. Bunun için yaklaşık $\frac{1}{2}$ ölçekli bir tanesi boş çerçeve, ikincisi kısa kolonlu model diğerleri ise kısa kolonlu modele açıklığın 0.25 ve 0.375 katı betonarme kanat dolgu duvar eklenmesi suretiyle 4 farklı model üretilmiştir. Deney elemanları tersinir tekrar eden yatay yüklere maruz bırakılarak bunlara ait yük-ötelenme ilişkileri elde edilmiştir. Bulunan deney sonuçlarına göre sisteme kanat dolgu duvar eklenmesiyle kısa kolon davranışının ciddi miktarda iyileştirilebileceği belirlenmiştir.

Tayfur ve Can (2018), perde duvarlarda bant tipinde bırakılan boşlukların çerçeve davranışına etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla bant pencere/çerçeve yüksekliği oranı sabit kalacak şekilde 5 tane model oluşturulmuştur. Ayrıca ilgili çerçeveye belirli adımlarla kanat duvar eklenerek tamamen duvarla doluncaya kadar devam ettirilmiştir. Yatay yükler altında çerçevelerin doğrusal statik analizleri yapılarak sistemin yer değiştirmeleri ve kolonların kesme kuvvetleri hesaplanmıştır. Kanat duvar boyunun artmasıyla hem yer değiştirmelerde hem de kısa kolonların kesme kuvvetlerinde düşüş olduğu belirlenmiştir. Dikkate alınan 5 model için bulunan kesme kuvvetlerinin birbirine yakın olmasına rağmen sünek davranışın görülmemesi, ötelenmeleri azaltırken kısa kolonun oluşma olasılığını da artırdığı belirtilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında, betonarme binalardaki kısa kolon davranışı genellikle doğrusal yöntem ve iki boyutlu modeller kullanılarak incelenmiştir. Buna ek olarak yapıların doğrusal olmayan davranışları dikkate alındığında ise doğrusal olmayan statik analiz ve sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmiştir. Ayrıca çalışmalar kısa kolonlu modellerin kesme kuvveti, momenti, gerilme durumları ve yük-yer değiştirme ilişkileri gibi parametreler üzerine yoğunlaşmakta olup yapıyı oluşturan elemanların hasar seviyelerine ve hasarların olduğu bölgeler üzerinde pek durulmamıştır. Bu çalışmanın amacı betonarme binalarda kısa kolon davranışının doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizleriyle belirlenmesidir. Bu amaç doğrultusunda hiçbir düzensizliğe sahip olmayan üç boyutlu 4- ve 7- katlı referans binalar oluşturulmuştur. Daha sonra bu binaların x doğrultusundaki en dış akslarında ve zemin katında bulunan kolonların boylarının azaltılmasıyla elde edilen kısa kolonlu modeller ile referans binalar kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Oluşturulan bina modellerinin doğrusal olmayan analizleri sonucunda yapı elemanlarının hasar seviyeleri ve sisteme ait taban kesme kuvveti, tepe noktası ve görelî kat ötelenmeleri gibi parametreler hesaplanarak kısa kolonun bu değişkenlerin üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

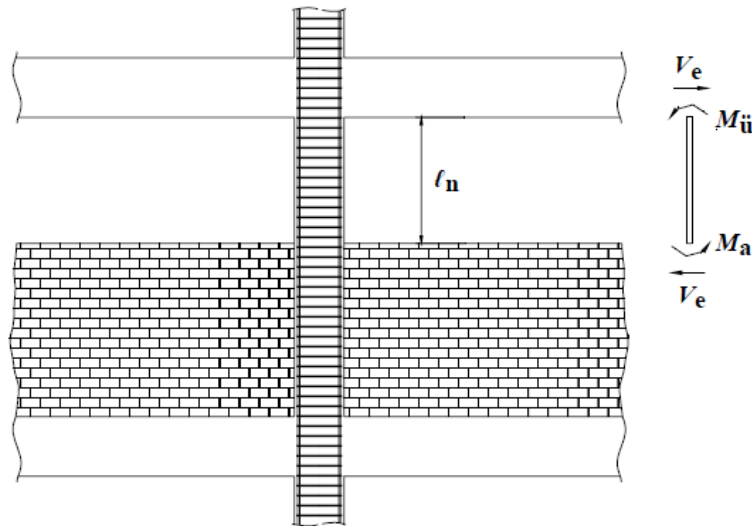
2. Materyal ve Metot

2.1. Kısa Kolon Davranışı

Betonarmeyi oluşturan çelik ve beton birbirini tamamlayan çok farklı özellikteki malzemelerdir. Bilindiği gibi çelik çekme gerilmelerine karşı dayanıklı iken beton basınç gerilmelerine karşı koymaktadır. Buna karşın şekildeğiştirme açısından bakıldığında beton gevrek, çelik ise sünek bir davranış göstermektedir. Eğer betonarme bir elemanda göçme hasar seviyesine ulaşılmasına beton sebep oluyorsa gevrek hasar, çelik neden oluyorsa sünek hasarın olduğundan bahsedilebilir. Kısa kolon davranışı, yapı elemanlarında donatı çeliğinin akmaması durumunda depremin enerjisi yeterince sönmülmeyen elemanların kesme kapasitelerinin aşılmasıyla gevrek bir şekilde göçme hasarının oluşmasıdır.

Bant pencere, bodrum katta havalandırma boşlukları, kat girişlerindeki süreksizlikler, eğimli arazideki temellerin farklı kotlarda uygulanması, kolon yüksekliği boyunca devam etmeyen dolgu ve perde duvarlar gibi düzenlemeler kolonun serbest yüksekliğini kısaltarak deprem yüklemesi durumunda binada kısa kolon davranışının oluşmasına neden olurlar (Şekil 1). Toplam moment sabit hale geldiğinde kolonun alacağı kesme kuvvetinin kolonun net uzunluğu ile ters orantılı olarak değiştiği Denklem 1'de açıkça görülmektedir. Bu nedenle kolonun net boyu azaldıkça kolona etkiyen kesme kuvveti yükselecektir. Kısa kolonlu modellerin gerçek anlamda kısa kolon davranışı gösterebilmesi için göçme hasar seviyesine kesme etkisiyle ulaşması gerekmektedir.

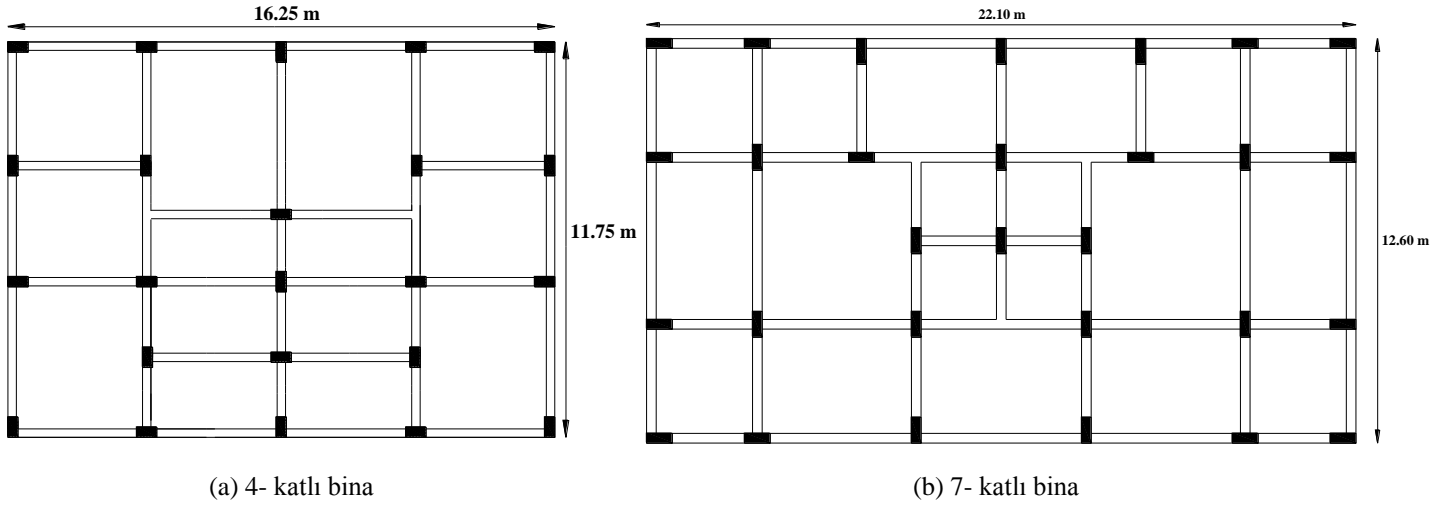
$$V_e = (M_a + M_{\ddot{u}}) / \ell_n \quad (1)$$



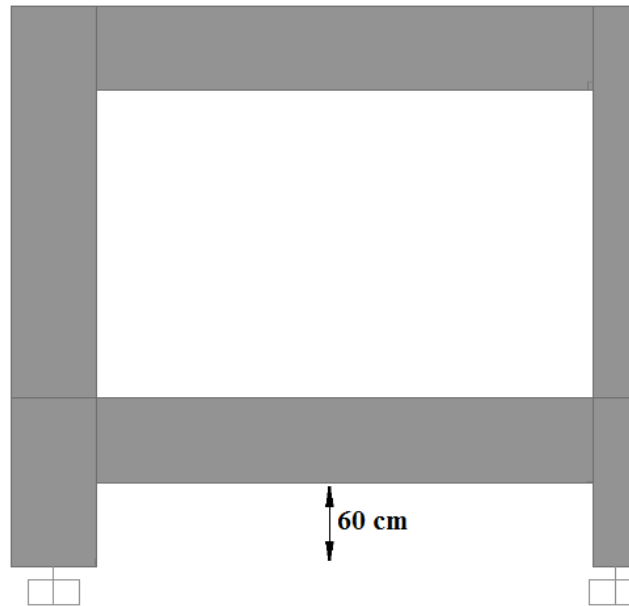
Şekil 1. Kolon net yüksekliğinin kısaltılması

2.2. Binalara ait Model Özelliklerinin Tanımlanması

Orta katlı betonarme binaların temsil edilmesi amacıyla 4- ve 7- katlı bina modellerinin tasarımı yapılmıştır. Bina modellerinin oluşturulmasında 2007 Deprem Yönetmeliği şartları dikkate alınmıştır (DBYBHY, 2007). Binalara ait kalıp planları Şekil 2’de verilmiştir. Yapı modellerinin Z3 zemin sınıfı üzerinde ve birinci derece deprem bölgesinde olduğu kabul edilerek süneklik düzeyi yüksek olarak ele alınmıştır. Bina modellerinin taşıyıcı sisteminin sadece çerçevelerden oluştuğu dikkate alınarak perde kullanılmamıştır. Malzeme dayanımı için karakteristik beton basınç dayanımı 25 MPa, boyuna ve enine donatılarının karakteristik akma dayanımı 420 MPa kullanılmıştır. Modellerin enine donatıları için sargı bölgelerinde 100 mm aralıklarla yerleştirilmiş 8mm çapında tek etriyeli çirozsuz donatılar göz önüne alınmıştır. Kolon ve kirişlerin boyuna donatı oranları seçilen kesitlerin %1’i kadar kullanılmıştır. Bina modellerinin oluşturulmasında ve analizlerinin gerçekleştirilmesinde SAP2000 programı kullanılmıştır (SAP2000, 2018). Çalışma kapsamında referans (REF) olarak isimlendirilen düzenli bina modelleri konut olarak tasarlanmış olup kat yükseklikleri ise 2.8m olarak alınmıştır. Çalışmada kısa kolon davranışı, modellenen binaların x yönündeki en dış iki aksında bulunan kolonların yüksekliklerinin en alt katta kirişin altından itibaren 60 cm bant pencereye denk gelecek biçimde oluşturulmasıyla dikkate alınmıştır (Şekil 3). Kırsalan boyları sebebiyle rijitlikleri artan kısa kolonların yapının rijitlik merkezini etkileyip burulma etkileri oluşturabileceğinden bu kolonlar binanın iki tarafında düşünülerek salt kısa kolon etkilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu modellerin isimlendirilmesinde “KK” ifadesi kullanılmıştır. Çalışmada dolgu duvarların ağırlıkları modellerde göz önüne alınmış olup modellerin yatay dayanımına olan etkisi dikkate alınmamıştır. Döşemeler tasarım sırasında yapılmamış, kendi ağırlıkları ve taşıdığı yükler bu döşeme parçalarının yanındaki kirişlere yayılı yük biçiminde tanımlanmıştır. Ayrıca döşemeler için rijit diyafram kabulü yapılarak her kat hizasında uygulanmıştır.

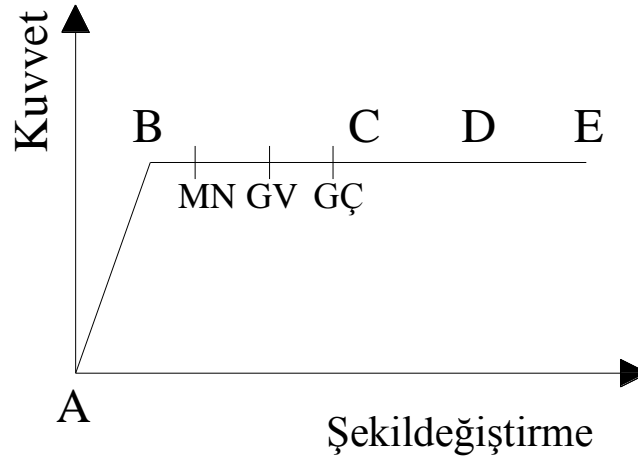


Şekil 2. Bina modellerinin kalıp planları



Şekil 3. Kısa kolonların oluşturulması

Yapılarda doğrusal olmayan davranış elemanlara atanan plastik mafsallarla sağlanmıştır. Bir plastik mafsala ait kuvvet-şekildeğiştirme davranışı için Şekil 4’de A, B, C, D ve E (performans durumları için MN, GV ve GÇ) sınırları belirlenmiştir. Eğilme mafsallarına ait bu sınırların oluşturulabilmesi için her bir elamana ait moment-eğrilik ilişkilerinin tanımlanması gerekir. Bunun için elemanların kritik olan kesitlerinde enine donatı durumu göz önüne alınarak sargılı betona ait birim şekildeğiştirme-dayanım ilişkileri elde edilmiştir. Donatı çeliğine ait birim şekildeğiştirme-dayanım ilişkisi DBYBHY-2007’de önerildiği şekliyle kullanılmıştır. Moment mafsalları için hasar sınır değerleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Moment mafsallarına ilave olarak, kolonlara kesme ve aksel yük mafsalları, kirişlere ise kesme mafsalları atanmıştır. Kesme mafsallarında belirli bir süneklik öngörülmemiş, yapıyı oluşturan elemanlar kesme kapasitelerine ulaşınca göçme durumuna geldiği kabul edilmiştir. Kesme dayanımları TS500 (2000)’e göre alınmıştır. Özellikle kısa kolonlu modellerde kısa kolon davranışının açığa çıkabilmesi için oluşturulan kısa kolonlarda kesme mafsallarının tanımlanması oldukça önemlidir. Plastik mafsal boyu DBYBHY-2007’de önerilen kesit yüksekliğine ait boyutun yarısı olarak kullanılmıştır. Beton modeli olarak DBYBHY-2007’de tanımlanan Mander sargılı beton modeli dikkate alınmıştır (Mander vd., 1988). Elemanların aksel yük miktarı, malzeme özellikleri, eleman tipi ve boyutları, boyuna ve enine donatı içeriği gibi parametrelerin göz önüne alınmasıyla moment-eğrilik ilişkilerinin elde edilerek plastik mafsalların tanımlanması ve bunların modellere aktarılması için SEMAp programından yararlanılmıştır (SEMAp, 2008).



Şekil 4. Plastik mafsala ait kuvvet - şekildeğiştirme ilişkisi

Tablo 1. Hasar sınırlarını oluşturan birim şekildeğiştirme kapasiteleri

Nokta	Beton - ϵ_c	Donatı Çeliği- ϵ_s
B	Akma dayanımı ve eğilme rijitliği belirler	
MN	$(\epsilon_{cu})_{MN} = 0.0035$	$(\epsilon_s)_{MN} = 0.010$
GV	$(\epsilon_{cg})_{GV} = 0.0035 + 0.01(\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.0135$	$(\epsilon_s)_{GV} = 0.040$
GÇ	$(\epsilon_{cg})_{GV} = 0.004 + 0.014(\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.018$	$(\epsilon_s)_{GÇ} = 0.060$
C	$(\epsilon_{cg})_C = 0.030$	$(\epsilon_s)_C = 0.5\epsilon_{su}$
D	$(\epsilon_{cg})_D = 0.035$	$(\epsilon_s)_D = 0.75\epsilon_{su}$
E	$(\epsilon_{cg})_E = 0.040$	$(\epsilon_s)_E = \epsilon_{su}$

Tablo 1’de gösterilen; ϵ_c : beton basınç birim şekildeğiştirmesi, ϵ_{cu} : en dış beton lifindeki basınç birim şekildeğiştirmesi, ϵ_{cg} : çekirdek betonunun en dış lifindeki şekildeğiştirmesi, ρ_s : kesitte mevcut olan enine donatının hacimsel oranı, ρ_{sm} : DBYBHY-2007’ye göre kesitte olması gereken enine donatı hacimsel oranı, ϵ_s : çelik birim şekildeğiştirmesi, ϵ_{su} : çeliğin kopma uzaması birim şekildeğiştirmesini ifade etmektedir.

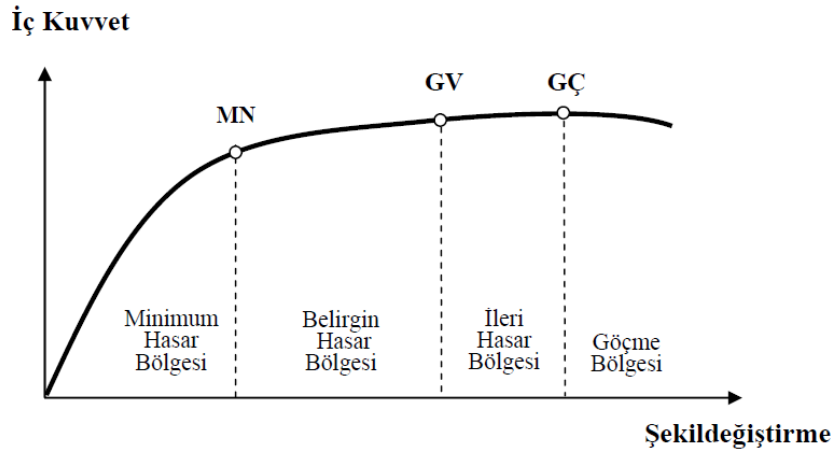
Çalışmada oluşturulan referans bina modellerinin karakteristik özellikleri Tablo 2’de gösterilmiştir. Betonarme yapı elemanlarının tasarımında çatlamış kesitlerin etkin eğilme rijitlikleri (EI)_e dikkate alınmıştır (DBYBHY, 2007). Kirişlerde 0.4EI ve kolonlarda aksel yükün seviyesine göre 0.4EI ile 0.8EI arasında bulunan değerler kullanılmıştır.

Tablo 2. Referans binalarına ait yapısal özellikler

Parametre	Yön	4-katlı bina	7-katlı bina
Yapının Boyutları (m)	X	16.25	22.1
	Y	11.75	12.6
Yapı Yüksekliği (m)		11.2	19.6
Kiriş Sayısı		36	44
Kiriş Boyutları (mm)		250x600	300x600
Kolon Sayısı		23	29
Kolon Boyutları(mm)		300x600	300x800
Period (s)	X	0.41	0.59
	Y	0.37	0.60
Yapı Ağırlığı (kN)		8328	21291

2.3. Elemanlara ait Hasar Seviyelerinin Belirlenmesi

Yapı elemanlarında eğilmeden dolayı oluşan hasar seviyeleri, bu elemanlarda hesap edilen beton ve donatı çeliğinin birim şekildeğiştirmeleri ile Tablo 1’de verilen hasar sınır şekildeğiştirme kapasitelerinin karşılaştırılmasıyla belirlenir. Burada MN minimum hasar sınırını, GV güvenlik sınırını, GÇ ise elemanların göçme sınırını tanımlamaktadır. Kritik kesitlerin hasar seviyesi MN’nin altında kalan elemanlar minimum hasar bölgesi’nde (MH), MN ve GV arasında kalanlar belirgin hasar bölgesi’nde (BH), GV ile GÇ arasında kalanlar ileri hasar bölgesi’nde (İH), GÇ’yi aşanlar ise göçme bölgesi’nde (GÇ) bulunurlar (Şekil 5). Kesmeden dolayı oluşan gevrek hasarlar için herhangi bir süneklik dikkate alınmadığından dolayı elemanlar kesme dayanımına erişince göçme bölgesinde (GÇ) olduğu varsayılmıştır.



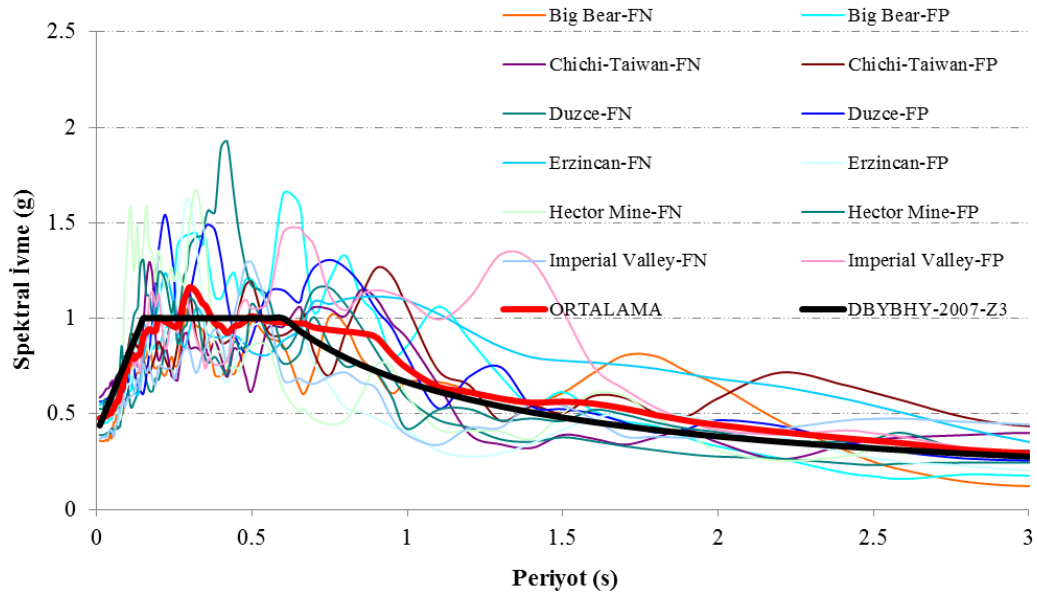
Şekil 5. Sünek elemanlar için hasar durumları (DBYBHY, 2007)

2.4. Analizlerde Kullanılan İvme Kayıtlarının Özellikleri

Doğrusal olmayan zaman tanım alanında yapılan analizlerde kullanılan deprem ivme kayıtları gerçek depremler arasından seçilen farklı özelliklere sahiptir (Peer, 2011). Çalışmada 2007 Deprem Yönetmeliği’nde Z3 sınıfı zemin üzerinde aşılma olasılığı 50 yılda %10 olan tasarım spektrumu göz önüne alınarak 12 adet ivme kaydı ölçeklendirilmesi yapılmıştır. Bu çalışmada faya normal (FN) ve faya paralel (FP) olmak üzere ikişer adet bileşeni kullanılan ivme kayıtlarının özellikleri Tablo 3’de verilmiştir. Seçilen kayıtların %5 sönüm için bulunan ivme spektrum değerleri Şekil 6’da gösterilmiştir. Spektrum değerleri oldukça geniş bir bant aralığına saçılırken, bina periyotlarının 0.30-0.60 saniye aralığında olduğu dikkate alındığında 12 ivme kaydının ortalamasının yönetmelik spektrumuna yakın olduğu gözükülmektedir.

Tablo 3. Çalışmada kullanılan deprem ivme kayıtlarına ait özellikler

No	Deprem Adı	Yıl	İstasyon	Bileşen	Ölçek Faktörü	PGA (g)	PGV (cm/s)	Vs30 (m/s)
1	Big Bear	1992	San Bernardino - E & Hospitality	FN	4.481	0.355	58.06	271.4
2	Big Bear	1992	San Bernardino - E & Hospitality	FP	4.481	0.451	61.38	271.4
3	Chi-Chi	1999	CHY101	FN	1.294	0.585	110.73	258.9
4	Chi-Chi	1999	CHY101	FP	1.294	0.489	140.39	258.9
5	Duzce	1999	Duzce	FN	1.086	0.388	67.53	276
6	Duzce	1999	Duzce	FP	1.086	0.564	86.28	276
7	Erzincan	1992	Erzincan	FN	1.12	0.545	106.85	274.5
8	Erzincan	1992	Erzincan	FP	1.12	0.47	50.72	274.5
9	Hector Mine	1999	Amboy	FN	2.573	0.502	67.22	271.4
10	Hector Mine	1999	Amboy	FP	2.573	0.521	56.21	271.4
11	Imperial Valley	1979	EC County Center FF	FN	2.057	0.37	112.07	192.1
12	Imperial Valley	1979	EC County Center FF	FP	2.057	0.457	88.36	192.1

**Şekil 6.** Depremlerin ivme kayıtlarına ait %5 sönüm için elastik tepki spektrumları

3. Bulguların Değerlendirilmesi

Gerçekleştirilen doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler sonucunda referans (REF) ve kısa kolonlu (KK) binaların elemanlarına ait hasar seviyeleri belirlenmiştir. Tüm ivme kayıtlarının sonuçları dikkate alınarak 4- ve 7-katlı modellerde sırasıyla Tablo 4-5’de kirişlerin, Tablo 6-7’de ise kolonların hasar oranlarının katlardaki dağılımı x ve y yönlerine göre gösterilmiştir. Net uzunlukları 60 cm’ye indirilmiş kolonlar artan rijitliklerinden dolayı kesme dayanımlarından daha fazla kesme kuvvetlerini kendilerine çekerek etrafında bağlı olan kirişlerin eğilme kapasitelerine ulaşmış ve sünek davranmalarını engelleyerek deformasyon yapmalarını sınırlamışlardır. Bunun sonucu olarak referans binalarındaki zemin kattaki kiriş hasar durumlarının kısa kolonlu binalara göre daha ileri seviyede olduğu Tablo 4-5’de açıkça görülmektedir. Üst katlarda da referans bina kirişlerinin daha sünek davrandığı görülmekle birlikte bazı katlarda kısa kolonlu modellere ait kirişlerin daha fazla hasar aldığına da rastlanmıştır. 4- katlı binaların en uç seviyedeki kiriş hasarlarına bakıldığında x yönü için zemin kat kirişlerinin %43.42’si belirgin hasar (BH) bölgesinde olduğu belirlenirken, y yönünde ise aynı kattaki kirişlerin %2.63’ü göçme bölgesinde (GÇ) olduğu görülmüştür. X ve y yönlerine

ait hasar seviyeleri kıyaslandığında y yönünde ilk iki kattaki kirişlerin bazılarının ileri hasar ve göçme bölgesinde olduğu, üçüncü katta ise diğer yöne göre minimum hasardan belirgin hasara geçen sınırlı sayıda kirişlerin olduğu anlaşılmaktadır. Hem referans hem de kısa kolonlu 4- katlı binalarda en üst kattaki kirişlerin tamamının minimum hasar (MH) bölgesinde yer aldığı belirlenmiştir.

Tablo 4. 4-katlı binada katlara göre kiriş hasar oranları (%)

Model	Kat No	X Yönü				Y Yönü			
		MH	BH	İH	GÇ	MH	BH	İH	GÇ
REF	1	56.58	43.42	0.00	0.00	50.88	46.05	0.44	2.63
	2	83.55	16.45	0.00	0.00	81.58	15.79	0.00	2.63
	3	100.00	0.00	0.00	0.00	97.37	2.63	0.00	0.00
	4	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
KK	1	84.65	15.35	0.00	0.00	85.31	12.28	0.44	1.97
	2	73.46	26.54	0.00	0.00	72.37	25.00	0.00	2.63
	3	100.00	0.00	0.00	0.00	96.93	3.07	0.00	0.00
	4	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00

Benzer şekilde, 4-katlı bina kirişlerinde olduğu gibi 7-katlı referans binaların kirişleri de kısa kolonlu binalara göre daha fazla deformasyon yaparak sünek bir davranış sergilemiştir. Minimum hasarı geçen kirişlerin hem referans hem kısa kolonlu bina gruplarında ilk dört katta yoğunlaştığı Tablo 5’de görülmektedir. Kiriş hasarları en fazla referans binalarda görülmekle birlikte ikinci katta x ve y yönlerinde sınırlı miktarda sırasıyla %0.67 ve %2.17 göçme oranları elde edilmiştir. Ayrıca göçme bölgesinde bulunan kirişlerin tamamının eğilmeden dolayı sünek bir şekilde göçme konumuna ulaştığı kesmeden kaynaklı göçme durumunun oluşmadığı tespit edilmiştir. Hem 4- katlı hem de 7- katlı kısa kolonlu modellerde ikinci kat kirişlerinin ilk kata göre hasar seviyesinin daha ileride olduğu belirlenmiştir. Kiriş hasar oranlarının beklenen bir biçimde zemin kattan birinci kata geçişin dışında üst katlara doğru azalan bir eğilim gösterdiği Tablo 5’den anlaşılmaktadır.

Tablo 5. 7-katlı binada katlara göre kiriş hasar oranları (%)

Model	Kat No	X Yönü				Y Yönü			
		MH	BH	İH	GÇ	MH	BH	İH	GÇ
REF	1	49.50	44.83	5.17	0.50	59.00	35.83	3.33	1.83
	2	47.50	47.17	4.67	0.67	56.67	37.67	3.50	2.17
	3	56.50	43.50	0.00	0.00	61.17	36.83	0.50	1.50
	4	90.17	9.83	0.00	0.00	80.00	19.67	0.00	0.33
	5	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	6	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	7	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
KK	1	73.17	25.17	1.67	0.00	73.83	23.00	2.17	1.00
	2	52.00	47.50	0.50	0.00	60.17	37.67	0.83	1.33
	3	59.83	40.17	0.00	0.00	63.67	35.00	0.00	1.33
	4	85.50	14.50	0.00	0.00	81.83	17.83	0.00	0.33
	5	99.83	0.17	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	6	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	7	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00

4-katlı kısa kolonlu binada zemin katta bulunan 23 kolondan 10 tanesi kısa kolon olarak tasarlanmıştır. Referans binalarda göçme konumuna geçen kolon görülmezken kısa kolonlu modellerde zemin katta x ve y yönünde sırasıyla kolonların %34.78 ve %40.58’i göçme seviyesine ulaşmıştır (Tablo 6). Kısa kolon olarak düşünülen 10 kolonun 6 tanesinin uzun boyutunun x yönünde olmasından dolayı kolonların kesme dayanımlarının y yönüne göre kısmen fazla olmasının x yönünde göçme konumuna geçen kolonları bir miktar azalttığı düşünülmektedir. Göçme seviyesindeki kolonların tamamı kısa kolonların kesme kırılmasıyla göçme hasarına uğramasından oluşmaktadır. Referans ve kısa kolonlu bina gruplarının her ikisinde de minimum hasarın ilk üç katta aşıldığı tespit edilmiştir. Alt katlardan üst katlara doğru gidildikçe kolonlardaki hasar seviyesinin azaldığı görülmektedir (Tablo 6).

Tablo 6. 4-katlı binada katlara göre kolon hasar oranları (%)

Model	Kat No	X Yönü				Y Yönü			
		MH	BH	İH	GÇ	MH	BH	İH	GÇ
REF	1	39.13	60.51	0.36	0.00	34.42	65.58	0.00	0.00
	2	83.33	16.67	0.00	0.00	61.59	38.41	0.00	0.00
	3	96.01	3.99	0.00	0.00	94.20	5.80	0.00	0.00
	4	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
KK	1	46.01	15.22	3.99	34.78	34.78	21.74	2.90	40.58
	2	75.72	24.28	0.00	0.00	67.03	32.97	0.00	0.00
	3	95.65	4.35	0.00	0.00	91.67	8.33	0.00	0.00
	4	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00

Erzincan-FN ivme kaydıyla yapılan doğrusal olmayan zaman tanım analizi sonucunda 7- katlı referans binanın zemin katındaki kolonlarda eğilmeden kaynaklı sünek bir şekilde göçme hasarı oluşmuştur. Buna bağlı bir biçimde diğer ivme kayıtları sonuçları arasında her iki yönde referans binada % 8.33'lük bir göçme hasarı olarak Tablo 7'de karşımıza çıkmaktadır. Zemin katın dışındaki diğer katlara bakıldığında en fazla sadece ileri hasara geçen sınırlı miktarda kolon bulunmaktadır. Kısa kolonlu olarak oluşturulan 7- katlı binada 29 kolondan 13 kolonun net boyu kısaltılarak kısa kolon haline getirilmiştir. Kısa kolonlu modellerin zemin katında x ve y yönünde sırasıyla kolonların en fazla %60.63 ve %54.89'u göçme hasarına uğramıştır. Elde edilen bu göçme hasarı oranlarına 4-katlı binadan farklı olarak kesme etkisiyle göçme durumuna ulaşılmasının yanında birkaç ivme kaydında moment kapasitesine eriştikten sonra deformasyon yaparak göçmeye ulaşan kolonlar da dâhil edilmiştir. Kısa kolonların hepsinin göçme durumuna kesme etkisiyle ulaştığı görülmüştür. Kısa kolon olarak tasarlanan 13 kolondan 8 kolonun uzun boyutunun x yönünde olmasına rağmen 4- katlı kısa kolonlu bina sonuçlarından farklı olarak eğilmeden dolayı göçme hasarı alan kolonların da katılmasıyla x yönünde daha fazla göçme hasarına geçen kolon miktarı elde edilmiştir. Hem referans hem de kısa kolonlu bina modellerinde en üst kat kolonların tamamının minimum hasarda bulunduğu hesaplanmıştır.

Tablo 7. 7-katlı binada katlara göre kolon hasar oranları (%)

Model	Kat No	X Yönü				Y Yönü			
		MH	BH	İH	GÇ	MH	BH	İH	GÇ
REF	1	19.54	68.10	4.02	8.33	29.31	62.36	0.00	8.33
	2	82.76	14.37	2.87	0.00	78.74	19.83	1.44	0.00
	3	79.60	19.83	0.57	0.00	83.91	16.09	0.00	0.00
	4	85.34	14.66	0.00	0.00	89.08	10.92	0.00	0.00
	5	94.25	5.75	0.00	0.00	98.28	1.72	0.00	0.00
	6	98.28	1.72	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	7	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
KK	1	18.97	12.64	7.76	60.63	17.82	25.29	2.01	54.89
	2	46.26	49.14	0.00	4.60	55.75	44.25	0.00	0.00
	3	85.92	13.22	0.86	0.00	85.92	13.79	0.29	0.00
	4	85.92	14.08	0.00	0.00	89.37	10.63	0.00	0.00
	5	94.25	5.75	0.00	0.00	98.85	1.15	0.00	0.00
	6	98.85	1.15	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	7	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00

Kısa kolon davranışının ayrıca sistem bazındaki etkilerini görebilmek amacıyla 96 adet 3-B doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizlerinden elde edilen taban kesme kuvveti, tepe noktası ötelenme ve maksimum görelî kat ötelenme oranı parametreleri kıyaslanarak değerlendirilmeler yapılmıştır. Modeller arasındaki değişimlerin daha iyi anlaşılması adına analizlerden bulunan taban kesme kuvveti değerleri yapının ağırlığına oranlanarak "taban kesme kuvveti oranı", tepe noktası deplasman değerleri bina yüksekliğine oranlanarak "tepe noktası ötelenme oranı" ve görelî kat deplasman değerleri de kat yüksekliği ile oranlanarak "görelî kat ötelenme oranı" parametreleri bulunmuştur. Gerçekleştirilen analizler sonucunda kısa kolonlu (KK) bina modellerinden hesaplanan değerler ile referans (REF) bina verileri karşılaştırılarak kısa kolonlu binalar ile referans binalar arasındaki farklar irdelenmiştir. Farkların ortaya konması için bulunan sonuçların minimum, maksimum, standart sapma ve ortalama değerleri hesaplanarak istatistiksel açıdan bunların modeller arasındaki değişimleri üzerinden açıklamalar yapılmaya çalışılmıştır.

Gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 4- ve 7- katlı referans binalarına ve kısa kolonlu binalara ait taban kesme kuvveti oranları Tablo 8’de gösterilmiştir. Net kolon boyunun azaltılmasıyla oluşturulan kısa kolonlardaki rijitlik artışına bağlı olarak kısa kolonlu binalara ait taban kesme kuvveti oranları ortalama değerler üzerinden değerlendirildiğinde referans binalara göre 4- ve 7- katlı binalarda sırasıyla yaklaşık %15 ve %10 dolayında artış görülmüştür. Taban kesme kuvveti oranları incelendiğinde hem referans hem kısa kolonlu binaların x ve y yönlerinde birbirine yakın sonuçlar bulunduğu görülmektedir. Katlar arasındaki farklara bakıldığında 7- katlı referans ve kısa kolonlu modellerde sırasıyla 4- katlı binalara göre %30 ve %35 civarında düşük taban kesme kuvveti oranları elde edilmiştir. Bu da kat sayısı arttıkça taban kesme kuvveti oranının azaldığını göstermektedir.

Tablo 8. 4- ve 7-katlı binalara ait taban kesme kuvveti oranları

Depremler	4-katlı bina				7-katlı bina			
	REF		KK		REF		KK	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Big Bear-FN	0.42	0.44	0.50	0.50	0.31	0.30	0.35	0.32
Big Bear-FP	0.45	0.46	0.53	0.51	0.33	0.32	0.36	0.33
Chichi-Taiwan-FN	0.45	0.47	0.52	0.52	0.33	0.31	0.38	0.37
Chichi-Taiwan-FP	0.41	0.44	0.52	0.54	0.32	0.30	0.32	0.31
Duzce-FN	0.43	0.46	0.53	0.54	0.29	0.28	0.32	0.31
Duzce-FP	0.43	0.46	0.54	0.52	0.31	0.30	0.28	0.28
Erzincan-FN	0.47	0.48	0.55	0.55	0.35	0.34	0.38	0.36
Erzincan-FP	0.43	0.43	0.48	0.50	0.29	0.29	0.32	0.32
Hector Mine-FN	0.41	0.40	0.47	0.50	0.28	0.28	0.32	0.31
Hector Mine-FP	0.42	0.42	0.42	0.45	0.30	0.28	0.34	0.32
Imperial Valley-FN	0.42	0.42	0.46	0.49	0.29	0.27	0.33	0.32
Imperial Valley-FP	0.44	0.46	0.52	0.50	0.33	0.31	0.37	0.35
Maksimum	0.47	0.48	0.55	0.55	0.35	0.34	0.38	0.37
Minimum	0.41	0.40	0.42	0.45	0.28	0.27	0.28	0.28
Standart Sapma	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03
Ortalama	0.43	0.45	0.50	0.51	0.31	0.30	0.34	0.32

Kısa kolonlarının rijitliğinin artması ve kesme etkisiyle göçme konumuna geçen kolonların varlığı yapının deformasyon yapma yeteneğini sınırladığı için kısa kolonlu binaların referans binalara kıyasla sünek davranmadığı Tablo 9’da görülmektedir. Bununla bağlantılı olarak 4- ve 7- katlı referans binaların tepe noktası ötelenme oranları kısa kolonlu bina modellerine göre sırasıyla %45 ve %27 civarında fazla hesaplanmıştır. Kısa kolon davranışının bulunan tepe noktası ötelenme sonuçları üzerindeki etkisinin 4- katlı binada 7-katlı binaya göre daha fazla hissedildiğini söylemek mümkündür. Tepe noktası ötelenme oranlarına ait minimum ile maksimum değerlerin arasındaki fark 4- ve 7- katlı binalarda sırayla 2.2 ile 2.8 ve 4.5 ile 5.2 aralıklarında değişmektedir.

Tablo 9. 4- ve 7-katlı binalara ait tepe noktası ötelenme oranları (%)

Depremler	4-katlı bina				7-katlı bina			
	REF		KK		REF		KK	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Big Bear-FN	0.43	0.33	0.27	0.23	0.58	0.53	0.38	0.43
Big Bear-FP	0.66	0.54	0.46	0.37	0.93	0.82	0.89	0.85
Chichi-Taiwan-FN	0.50	0.49	0.33	0.24	0.82	0.76	0.58	0.67
Chichi-Taiwan-FP	0.35	0.51	0.24	0.32	0.87	0.82	0.72	0.68
Duzce-FN	0.53	0.46	0.35	0.39	0.66	0.61	0.63	0.60
Duzce-FP	0.73	0.76	0.60	0.49	0.70	0.67	0.22	0.21
Erzincan-FN	0.94	0.76	0.52	0.40	1.41	1.48	1.00	1.11
Erzincan-FP	0.46	0.38	0.35	0.31	0.36	0.32	0.31	0.30
Hector Mine-FN	0.34	0.35	0.36	0.35	0.29	0.30	0.26	0.27
Hector Mine-FP	0.35	0.27	0.21	0.23	0.39	0.37	0.31	0.33
Imperial Valley-FN	0.39	0.31	0.28	0.24	0.49	0.47	0.37	0.38
Imperial Valley-FP	0.50	0.36	0.27	0.28	0.74	0.79	0.60	0.59
Maksimum	0.94	0.76	0.60	0.49	1.41	1.48	1.00	1.11
Minimum	0.34	0.27	0.21	0.23	0.29	0.30	0.22	0.21
Standart Sapma	0.18	0.16	0.12	0.08	0.31	0.32	0.26	0.27
Ortalama	0.51	0.46	0.35	0.32	0.68	0.66	0.52	0.53

4- ve 7-katlı binalara ait görel kat ötelenmesi değerlerinin kat yüksekliğine bölünmesi sayesinde elde edilen maksimum görel kat ötelenme oranları Tablo 10’da gösterilmiştir. Referans binalarının kısa kolonlu binalara göre daha sünek davrandığı tepe noktası

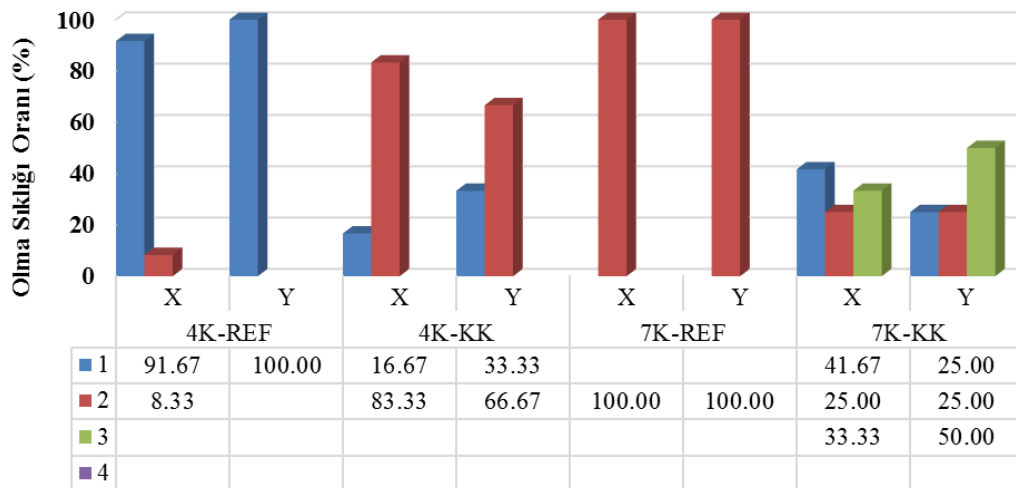
ötelenme oranlarında olduğu gibi görel kat ötelenme sonuçlarında da görülmektedir. Ortalama görel kat ötelenme oranları üzerinden yapılan kıyaslamada 4- ve 7- katlı referans binalara ait değerler kısa kolonlu bina verilerine bölündüğünde sırasıyla x yönü için 1.36, 1.02 ve y yönü için ise 1.29, 1.17 değerleri bulunmuştur.

Tablo 10. 4- ve 7- katlı binalara ait görel kat ötelenme oranları (%)

Depremler	4-katlı bina				7-katlı bina			
	REF		KK		REF		KK	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Big Bear-FN	0.67	0.60	0.49	0.45	1.06	0.99	0.89	0.75
Big Bear-FP	1.18	0.93	0.82	0.90	1.83	1.51	3.51	2.28
Chichi-Taiwan-FN	0.86	0.92	0.57	0.41	1.55	1.42	1.16	1.18
Chichi-Taiwan-FP	0.59	0.99	0.41	0.56	1.63	1.49	2.11	1.46
Duzce-FN	0.93	0.84	0.65	0.72	1.16	1.03	1.16	1.10
Duzce-FP	1.26	1.50	1.46	1.35	1.35	1.21	0.39	0.39
Erzincan-FN	1.77	1.53	0.92	0.83	2.86	2.85	1.92	1.96
Erzincan-FP	0.79	0.70	0.63	0.60	0.66	0.61	0.56	0.54
Hector Mine-FN	0.51	0.55	0.62	0.67	0.50	0.54	0.47	0.52
Hector Mine-FP	0.60	0.45	0.37	0.41	0.66	0.64	0.61	0.57
Imperial Valley-FN	0.67	0.53	0.49	0.43	0.90	0.86	0.71	0.72
Imperial Valley-FP	0.83	0.63	0.46	0.54	1.39	1.43	1.74	0.99
Maksimum	1.77	1.53	1.46	1.35	2.86	2.85	3.51	2.28
Minimum	0.51	0.45	0.37	0.41	0.50	0.54	0.39	0.39
Standart Sapma	0.36	0.36	0.30	0.27	0.65	0.63	0.91	0.60
Ortalama	0.89	0.85	0.66	0.66	1.30	1.22	1.27	1.04

Hesaplanan istatistiksel verilerin standart sapma değerleri incelendiğinde taban kesme kuvvetine ait standart sapmaların tepe noktası ve görel kat deplasmanların değerlerine göre daha düşük bulunduğu belirlenmiştir. Tüm bina gruplarının taban kesme kuvvetleri için standart sapma değerleri birbirine yakın olmakla birlikte kısa kolonlu modellerde referans binalara göre deplasman taleplerine ait standart sapma değerlerinde genel olarak bir miktar azalma hesaplanmıştır. Katlar açısından bakıldığında 4- katlı binaların tepe noktası ve görel kat ötelenme oranlarına ait standart sapma değerlerinin 7- katlı binalara kıyasla daha düşük hesaplandığı görülmüştür.

Dikkate alınan binalarda görel kat deplasmanına ait maksimum değerlerin olduğu kat bulunarak diğer katlar arasındaki durumu Şekil 7’de verilmiştir. 4- katlı referans ve kısa kolonlu binalarda maksimum görel kat deplasmanın 1. ve 2. katta olduğu gözlemlenirken, referans binalarda 1. katta kısa kolonlu binalarda ise 2. katta sıklıkla ortaya çıktığı belirlenmiştir. 7- katlı referans binalarında ise maksimum deplasmanın tamamının 2. katta olduğu belirlenirken kısa kolonlu bina modellerinde 1., 2. ve 3.kata yayıldığı görülmüştür.



Şekil 7. 4- ve 7-katlı binalarda maksimum görel kat ötelenmesinin olduğu katlara göre dağılımı (maksimum görel kat deplasmanın ilgili katta oluşma sayısı /seçilen ivme kaydı sayısı)

4. Sonuçlar

Bu çalışmada kısa kolon davranışının orta katlı betonarme yapılar üzerindeki etkileri doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizlerle belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla herhangi bir düzensizliğe sahip olmayan 4- ve 7- katlı referans bina modelleri 3-B olarak tasarlanmıştır. Daha sonra kısa kolon etkilerinin belirlenebilmesi için modellerin x yönündeki en dış iki aksında bulunan kolonların net boyları kısaltılarak kısa kolonlu bina modelleri oluşturulmuştur. Gerçek deprem ivme kayıtları arasından seçilen 12 adet deprem kaydıyla referans ve kısa kolonlu binaların x ve y yönünde olmak üzere toplamda 96 adet doğrusal olmayan analizi yapılmıştır. Doğrusal olmayan analizler sonucunda 2007 Deprem Yönetmeliği'ne göre yapı elemanlarının hasar seviyeleri ve sistem bazındaki taban kesme kuvveti oranı, tepe noktası ve görelî kat ötelenme oranı gibi parametreler hesap edilmiştir. Referans ve kısa kolonlu binalardan elde edilen hasar durumları ve değişkenler üzerinden karşılaştırmalar yapılarak kısa kolon davranışının etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen bilgiler doğrultusunda aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

- Kısa kolonlu modellerde kesme etkisinden dolayı kısa kolonlar moment kapasitelerine ulaşamayıp etrafındaki bağılı olan kirişleri zorlamadıklarından kirişlerin yeterli deformasyon yapmalarını sınırlandırmıştır. Buna bağılı olarak referans binaların zemin katındaki giriş hasarlarının kısa kolonlu binalara göre daha ileride olduğu bulunmuştur. Ayrıca kısa kolonlu bina modellerinin ikinci kat girişlerindeki hasar durumunun zemin kata göre daha fazla olduğu görülmüştür.
- 4- katlı referans binada göçme hasarına uğrayan kolona rastlanmazken kısa kolonlu modellerde zemin katta kolonlarda %40'a varan oranda göçme hasarı elde edilmiştir. 7-katlı binada kolonlardaki göçme durumuna bakıldığında referans binanın zemin katında %8 gibi sınırlı bir hasar görülürken kısa kolonlu binada %60 dolayında hasarın olduğu tespit edilmiştir. Tüm modeller dikkate alındığında zemin kattan üst katlara doğru gidildikçe genel olarak kolonlardaki hasar seviyesinin azalarak iyileştiği gözlemlenmiştir.
- Kolonların net boylarının azaltılmasıyla oluşturulan kısa kolonların rijitliğinin artması ve kendilerine daha fazla kesme kuvveti çekmesinden dolayı 4- ve 7- katlı kısa kolonlu binalarda referans binalara göre sırasıyla taban kesme kuvveti oranlarında yaklaşık %15 ve %10 civarında artış hesaplanmıştır.
- Kısa kolonların sünek davranışa izin vermemesi deplasman taleplerinde de hissedilirken 4- ve 7- katlı referans binalarda tepe noktası ötelenme oranlarında kısa kolonlu bina modellerine göre sırasıyla %45 ve %27 dolayında artış bulunmuştur.
- Görelî kat ötelenme oranlarında da tepe noktası ötelenme taleplerindeki değişime benzer bir eğilim görülmüştür. Referans binaların kısa kolonlu bina modellerine göre sünek bir davranış sergilediği 4- ve 7- katlı referans binaların görelî kat ötelenme oranlarının yaklaşık olarak referans binalara kıyasla sırasıyla %30 ve %10 civarında fazla olduğu hesaplanmıştır.
- Genel olarak değerlendirildiğinde kısa kolonun hasar durumuna etkisi 7-katlı binada 4-katlı binaya göre daha fazla olurken taban kesme kuvveti ve deplasman taleplerindeki değişim miktarı 4-katlı binada 7-katlı binaya nazaran daha fazla hissedilmektedir.

Referanslar

Bayraktar, A., Altunişik, A. C., Pehlivan, M. (2013). Performance and damages of reinforced concrete buildings during the October 23 and November 9, 2011 Van, Turkey, earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 53, 49-72. doi: 10.1016/j.soildyn.2013.06.004

Çağatay, İ.H., Beklen, C. (2009). Düzlem çerçevelerde kısa kolon etkisinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(1), 91-97.

DBYBHY. (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.

Demir, S., Hüsem, M., Altın, S., Pul, S., Bikçe, M., Emsen, E. (2013). Mevcut betonarme yapılarda kısa kolon davranışlarının iyileştirilmesi. 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 25-27 Eylül, Hatay.

Inel, M., Ozmen, H.B., Akyol, E. (2013). Observations on the building damages after 19 May 2011 Simav (Turkey) earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(1), 255-283. doi: 10.1007/s10518-012-9414-3

Işık, G. (2006). Betonarme binaların zemin katında oluşabilen kısa kolon ve yumuşak kat davranışının incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon, Türkiye.

Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1825. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)

- Mutlu, M. (2007). Deprem etkisindeki betonarme binalarda kısa kolon etkisinin doğrusal olmayan davranışının incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, Türkiye.
- Özmen, H.B., Inel, M., Akyol, E., Cayci, B.T., Un, H. (2014). Evaluations on the relation of RC building damages with structural parameters after May 19, 2011 Simav (Turkey) earthquake. *Natural Hazards*, 71(1), 63-84. doi: 10.1007/s11069-013-0900-y
- Özmen, H.B. (2005). Hızlı değerlendirme yöntemlerinde kullanılan parametrelerin yapı performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, Türkiye.
- Peer. (2011). Pacific Earthquake Engineering Research Center. <http://peer.berkeley.edu>, Erişim tarihi: 10.12.2018.
- SAP2000.V-20. (2018). Structural Analysis Program, Integrated finite element analysis and design of structures basic analysis reference manual, Computers and Structures Inc., Berkeley (CA, USA).
- SEMAp. (2008). Sargı Etkisi Modelleme Analiz Programı. Tubitak Proje No: 105M024.
- Tayfur, B., Can, Ö. (2018). Farklı yüksekliğe sahip boşluklu perde duvarlara ait davranış eğrilerinin SAP2000 OAPI ile elde edilmesi. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 6(3), 84-91.
- TS500. (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Yon, B., Sayin, E., Calayir, Y., Ulucan, Z.C., Karatas, M., Sahin, H. , Alyamac, K.E., Bildik, A.T. (2015). Lessons learned from recent destructive Van, Turkey earthquakes. *Earthquakes and Structures*, 9(2), 431-453. doi: 10.12989/eas.2015.9.2.431
- Yön, B., Sayın, E., (2008). Kısa kolon teşkilinin yapı hasarlarına etkisi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24 (1), 241-259.



Bir İç Lojistik Sistem Probleminin, Araç Rotalama Çözüm Yöntemleri ile İyileştirilmesi

Improvement of an Plant Logistics System Problem with Vehicle Routing Solution Methods

Seçil Kulaç¹ , Gültekin Çağıl¹ 

¹Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 54050, Sakarya, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 11/11/2018

Kabul/Accepted: 14/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Üretim Lojistiği, Tedarik Lojistiği ve Dağıtım Lojistiği'ne göre daha az çalışma yapılmış ve iyileştirmeye açık bir alandır. Bu çalışmayla amaçlanan; Yalın Üretim felsefesinin uygulandığı üretim ortamında taşıma maliyetlerini azaltan, katma değerli süreyi arttıran, kolay yönetilebilir, standardize edilmiş malzeme taşıma sistemi oluşturmaktır. Bu amaçla, fabrika içerisindeki yarı mamül dağıtım işlemi Araç Rotalama Problemi (ARP) olarak değerlendirilmiş ve bu problemin çözüm yöntemlerinden olan Clarke ve Wright Tasarruf Algoritması ve Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (KARP) matematiksel modeli kullanılarak yarı mamül dağıtım operatörünün minimum sürede çevrimini tamamlayacağı dağıtım rotaları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar mevcut durum ile karşılaştırılmış ve en iyi sonucu Clarke ve Wright Tasarruf Algoritması'nın verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“Üretim Lojistiği, Araç Rotalama Problemi (ARP), Clarke ve Wright Tasarruf Algoritması”

Abstract

Plant Logistics when compared to Inbound and Outbound Logistics is a less studied subject open to improvement. It is aimed to construct such a plant logistics structure in a lean manufacturing environment that enables less handling costs, increasing value added time and having an easily manageable and standardized material handling system. With this aim, semi-finished goods distribution in the factory is considered as a Vehicle Routing Problem (VRP). Distribution routes to be completed by the distribution operator in a minimum time using the Clarke and Wright Algorithm and the Capacity Limited Vehicle Routing Problem mathematical model, which are one of the VRP solution methods. The results were compared with the current situation and the best result was the Clarke and Wright algorithm.

Key Words

“Plant Logistics, Vehicle Routing Problem (VRP), The Clarke and Wright Algorithm”

1. Giriş

Rekabet ortamının geçmiş yıllara göre daha da arttığı günümüzde, tüm israflardan arınmayı hedefleyen yalın üretim yaklaşımı yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu yaklaşımda önemli israf kaynaklarından biri de malzeme taşıma işlemindeki kayıplardır. Bu kapsamda ön plana çıkan önemli konulardan biri yalın üretim ortamında lojistik sisteminin nasıl olması gerektiğidir. Bu durum, yalın lojistik olarak kaynaklarda yerini almaya başlamıştır (Kılıç, 2011).

Lojistik kavramı genellikle tedarikçi-tesis ve tesis- müşteri arasındaki taşıma olarak değerlendirilmektedir. Lojistiğin önemli bir boyutu da üretim lojistiği olarak da bilinen iç lojistik yönüdür (Kılıç, 2011).

Bu çalışmada bir fabrikadaki üretim içi yarı mamül dağıtım problemi dikkate alınmıştır. Fabrikanın Kablo Kesim Bölümü'nde üretilen yarı mamullerin montaj hatlarına dağıtım için periyodik malzeme taşıma işlemi yapan bir sistem bulunmamaktadır. Yarı mamullerin üretim makinelerinden toplama ve montaj hatlarına dağıtım işleminin aynı operatör tarafından yapılması operatörlerin yürüme mesafesinin fazla olmasına sebep olmaktadır. Ayrıca dağıtım rotalarının belirlenmesinde herhangi bir bilimsel yöntem kullanılmaması operatörlerin katma değersiz faaliyetler yapmasına sebep olarak taşıma maliyetlerini arttırmaktadır. Bu problemlerin çözümü için öncelikle yarı mamul toplama ve montaj hatlarına dağıtım işlemlerinin farklı operatörler tarafından yapılması planlanmıştır. İkinci aşamada montaj hatlarına dağıtım işlemi Araç Rotalama Problemi olarak değerlendirilmiş ve bu problemin çözüm yöntemlerinden olan Clarke ve Wright Tasarruf Algoritması ve Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (KARP) matematiksel modeli kullanılarak minimum mesafede gerçekleştirilebilecek yarı mamul dağıtım rotaları belirlenmiştir. Son olarak belirlenen dağıtım rotalarına göre makinelerden yarı mamul toplama işlemi standart hale getirilmiştir. Elde edilen sonuçlar mevcut durum ile karşılaştırıldığında önerilen sistemin taşıma aracının etkin kullanılmasını, katma değersiz faaliyetlerin ve taşıma maliyetlerinin azaltılmasını sağladığı görülmüştür.

Çalışmanın bundan sonraki kısmı genel olarak şu bölümlerden oluşmaktadır: ikinci bölümde, kaynak araştırmasına yer verilmiş, üçüncü bölümde ARP çözüm yöntemleri anlatılmış ve dördüncü bölümde ise uygulama kısmına yer verilmiştir. Son olarak çalışmada elde edilen bulgular sonuç bölümünde özetlenmiştir.

2. Kaynak Araştırması

İç lojistik sisteminin iyileştirilmesi ile ilgili hücreyel yerleşim ve hücreler arası akışlarla ilgili incelenen çalışmalarda genelde hücre içi taşımaların ön planda olduğu görülmüştür. Hücreler arası taşımalara ilişkin çalışmalar daha az sayıdadır. Bu noktada taşıma sayısını azaltıcı modeller geliştirilmiştir. Sezgisel modeller ağırlıklı olarak kullanılmakta, bununla birlikte melez modellere de sıklıkla rastlanılmaktadır. Literatürde daha az çalışma yapılan alan ise depo-istasyon, istasyon-depo ve istasyon-istasyon arası akışlardır. Yalın üretim ortamına ilişkin malzeme taşıma sistemlerinin modellenmesine yönelik benzetim çalışmaları da oldukça fazladır (Kılıç, 2011). İç lojistik süreçlerinin iyileştirilmesi ile ilgili incelenen çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Kılıç (2011) tarafından yapılan çalışmada, üretim içi döngüsel sefer problemi sınıflandırılmış ve her sınıflandırmaya ilişkin modellemeler yapılmış, belirli bir sınıf için sezgisel ve alt sınır algoritmaları geliştirilmiştir. Çoban ve Güven (2011) fabrika içi lojistik süreçlerinin iyileştirilmesi amacıyla Matematiksel Modelleme Yöntemi'ni kullanmıştır. Kılıç ve Durmuşoğlu (2013) üretim içi malzeme taşıma sisteminde süreç içi stok ve taşıma maliyetlerini minimize eden amaçlayan bir karışık tamsayılı matematiksel programlama modeli ve sezgisel yaklaşım önermişlerdir. Staab vd. (2016) simülasyon modeli geliştirerek fabrika içi malzeme taşıma sisteminin etkinliğini analiz etmiştir. Küçüköğlü vd. (2018) otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir fabrikada üretim içi malzeme taşıma probleminin çözümü için Matematiksel Modelleme Yöntemi'ni kullanmıştır. Toplam dolaşım mesafesinin ve hat yanı stok miktarının azaltılmasını sağlayacak karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında incelenen diğer bir konu ise ARP'dir. Bu probleme ilişkin literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. ARP çözüm yöntemleri ile ilgili incelen literatürler aşağıda açıklanmaktadır.

Demircioğlu (2009) bir dağıtım firmasında homojen araçlı kapasite kısıtlı araç rotalama problemi çözümü için Tasarruf Algoritması'nı kullanmıştır. Yazgan (2014) talep ve kapasite kısıtlı optimizasyon problemi için Clarke ve Wright tasarruf algoritması ile en kısa yol yöntemini esas alan yeni bir melez algoritma geliştirmiştir. Karagül vd. (2016) Kapasite kısıtlı araç rotalama problemlerinde başlangıç rotalarının belirlenmesi için melez bir algoritma önermişlerdir. Kızıloğlu (2017) çalışmada stokastik talepli çok depolu ARP çözümü için Tasarruf Algoritması, En Yakın Komşu Arama Algoritması ve Rassal Arama Algoritması'nı kullanmıştır.

İncelenen çalışmalar içinde, üretim içi rotalamaya ilişkin çalışmaların azlığı dikkat çekmektedir ve genellikle depo ve istasyonlar arası hammadde dağıtım rotalarının belirlenmesine yönelik çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada iç lojistik sistemindeki istasyonlar arası yarı mamul taşıma problemi çözümü için Araç Rotalama Problemi çözüm yöntemlerinden yararlanılmıştır. Gerçek üretim ortamında yapılan bu çalışmanın bu açıdan literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

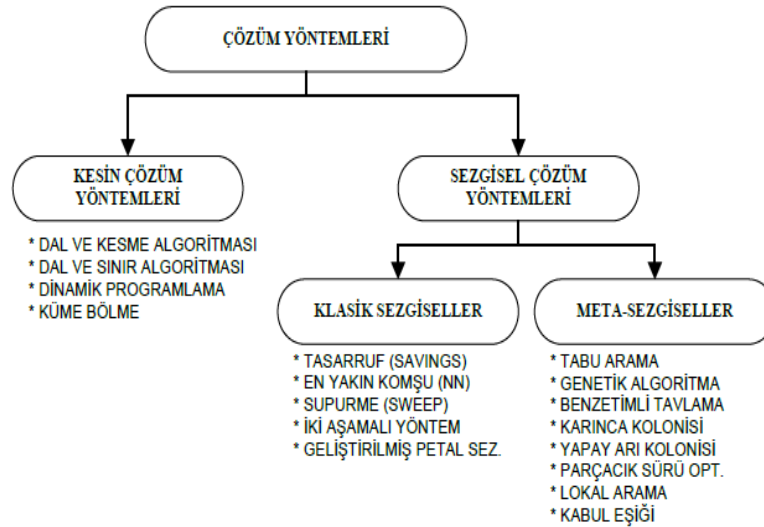
3. Materyal ve Yöntem

3.1. Araç Rotalama Problemi

Araç rotalama problemi (ARP), 50 yıldan fazla üzerinde çalışılan bir konudur. ARP ilk olarak Dantzig ve Ramser tarafından 1959 yılında çalışılmıştır. Clarke ve Wright 1964 yılında Dantzig ve Ramser'in yöntemini geliştirmiş ve klasik tasarruf metodunu önermişlerdir. Bundan sonra farklı ARP'lere çözüm bulmak için yüzlerce model ve algoritma önerilmiştir (Demircioğlu, 2009).

ARP, lojistik maliyetlerinin %50'sini oluşturan dağıtım faaliyeti içinde değerlendirilmektedir (Rushton, 2006). Bu bağlamda, ARP'nin analizi ve çözümler geliştirilmesi ile doğrudan işletmelerin lojistik maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlanmaktadır. ARP, zamanla farklı yapılar çevrilmiş ve bu yapılar yeni araç rotalama problem türleri olarak literatürdeki yerlerini almışlardır. ARP'nin başlıca türleri: kapasite kısıtlı (KARP), mesafe ve kapasite kısıtlı (MKARP), zaman pencereli (ZPARP), geri toplamalı (GTARP), dağıtım ve toplamalı (DTARP), açık (AARP), çoklu depo (ÇDARP), bölünmüş teslimatlı (BTARP), periyodik (PARP), heterojen filolu (HFARP) ve bulanık araç rotalama problemi (BARP) olarak ifade edilebilirler (Şahin, 2014).

Bu çalışmanın da temel konusu olan KARP'de, her aracın belirli bir kapasitesi vardır ve bu araçların kapasiteleri birbirine eşittir. Müşterilerin talepleri de araç kapasiteleri gibi önceden bellidir. Araçlar hareketine depodan başlar ve tekrar depoya dönerek rotalarını sonlandırırlar. Teslimatlar müşterilere tek seferde gönderilir (Yazgan, 2014). Problemin amacı her bir araç için düşük maliyet ve kapasite kısıtlarını aşmayan rota kümelerini oluşturmaktır. Rota ise, depodan başlayarak, müşteri ziyaret noktalarının bir araç tarafından ziyaret edilmesi ve tekrar başlangıç deposuna ulaşması ile elde edilen bir tur olarak tanımlanmaktadır. Bu turlarda her bir müşterinin yalnızca bir kez ziyaret edilmesi kısıtı da sağlanmalıdır (Karagöl, 2016). KARP için genel çözüm yöntemleri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. KARP İçin Çözüm Yöntemleri (Şahin, 2014)

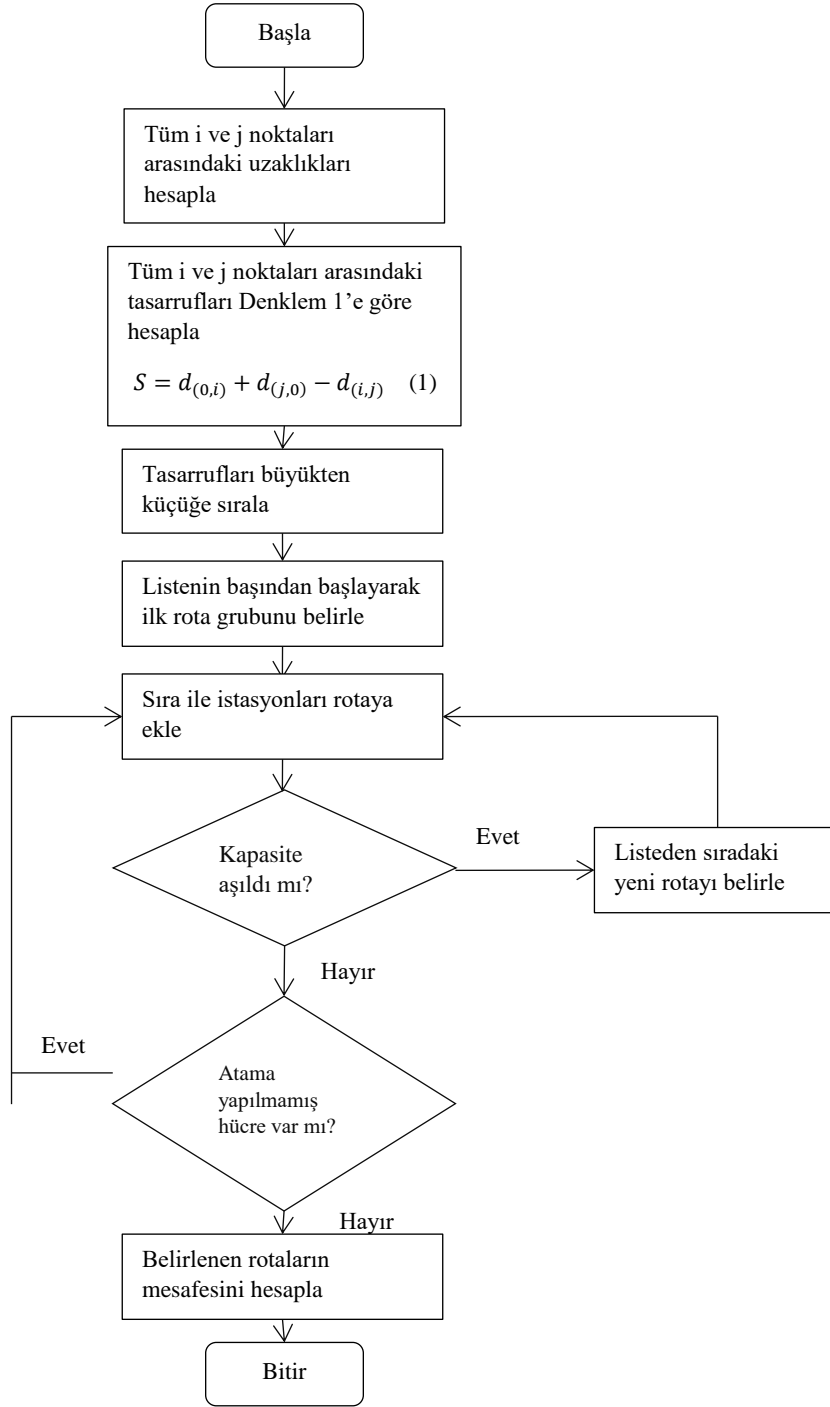
Bu çalışmada, fabrika içi yarı mamül dağıtım rotalarının belirlenmesi için KARP çözüm yöntemlerinden olan Clarke ve Wright Tasarruf Algoritması ve KARP matematiksel modeli kullanılmıştır.

3.2. Tasarruf Yöntemi

Clark ve Wright Tasarruf Algoritması en çok bilinen ARP sezgisel yöntemlerinden biridir. 1964'te Clark ve Wright tarafından geliştirilmiştir ve araç sayısının belirli olmadığı problemlere uygulanmaktadır (Şeker, 2007).

Tasarruf Algoritması'nın ardışık ve paralel olmak üzere iki versiyonu bulunmaktadır. Sıralı versiyonda, aynı anda bir rota tek bir rota inşa edilebilirken, paralel versiyonda ise aynı anda birden fazla rota oluşturulabilmektedir (Kızıloğlu, 2017).

Şekil 2'de Tasarruf Algoritması'nın akış diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2. Tasarruf Yöntemi Akış Diyagramı

3.3. KARP ve Matematiksel Modeli

Problemin amaç fonksiyonu ve kısıtlara ait matematiksel model aşağıdaki gibidir (Şahin, 2014).

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ bağlantı noktaları $v_0 = \text{Depo}$,

d_{ij} : i müşterisinden j müşterisine olan mesafe, (KARP için $d_{ij} = d_{ji}$),

$K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\}$ araç filosu ve m : toplam araç sayısı,

$Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_m\}$ Araç kapasiteleri (KARP için $Q_1=Q_2=\dots=Q_m$),

q_i : i müşterisinin talep miktarı olmak üzere;

$x_{ij}^k \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ aracı } i \text{'den sonra } j \text{'y ziyaret ederse} \\ 0, & \text{aksi taktirde} \end{cases}$

$y_i^k \begin{cases} 1, & \text{eğer } i \text{ düğümüne } k \text{ aracı hizmet verirse} \\ 0, & \text{aksi taktirde} \end{cases}$

Amaç Denklemi:

$$\text{Min } \sum_{k \in K} \sum_{i, j \in V} d_{ij} x_{ij}^k \quad (2)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in V \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij}^k + \sum_{j \in V} x_{ji}^k = 1 \quad \forall i \in V, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n x_{0j}^k = K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j \in V} x_{j, n+1}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$x_{ij}^k = 1 \Rightarrow y_i - q_i = y_j \quad \forall i, j \in K, \forall k \in K \quad (8)$$

$$y_0 = Q, 0 \leq y_i \quad \forall i \in V \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n q_i \sum_{j=0, i \neq j}^n x_{ij}^k \leq Q \quad k \in \{1, \dots, m\} \quad (10)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V, \forall k \in K \quad (11)$$

Denklem (2), araçlarının dolaşacağı toplam mesafenin minimizasyonunu gösteren amaç fonksiyonudur. Denklem (3), her müşteriye bir aracın hizmet vermesini sağlar. Denklem (4), geri dönüşlerin engellenmesini sağlar. Denklem (5), tüm araçların depodan çıkmasını sağlar. Denklem (6), her aracın depodan bir defa ayrılmasını sağlar. Denklem (7) her aracın müşterilere bir kez uğramasını sağlar. Denklem (8), aracın i-j düğümüne atanması halinde i düğümünden j düğümüne geldiğinde kalacak kapasiteyi göstermektedir. Denklem (9), her aracın kapasitesinin Q değeri ile başladığını gösterir. Denklem (10) ile rotadaki müşterilerin talepleri bu Q değerini aşamayacağı kısıtlanmıştır. Denklem (11) ise x 'in 0 ve 1 tamsayı değerini almasını sağlayan kısıttır.

4. Uygulama

Bu çalışmada, otomotiv kablo donanımlarını üreten firmada fabrika içi yarı mamül taşıma süreçlerinin iyileştirilmesi amacıyla ARP çözüm yöntemlerinden olan Clarke ve Wright Tasarruf Algoritması ve KARP matematiksel modeli kullanılarak taşıma maliyetlerini minimize eden rotalar tespit edilmiştir.

4.1. Problemin Tanımı

Uygulamada Kesim Bölümü'nde üretilen yarı mamullerin montaj hatlarına dağıtımını değerlendirmeye alınarak bu bölümde çalışma yapılmıştır. Kesim Bölümü'nde üretilen kablolar makinelerden toplanarak, 19 farklı istasyona dağıtımını yapılmaktadır.

Mevcut durumda kablo dağıtım operatörü kesim makinelerinin başlangıç noktasından başlayarak üretilen kabloları hangi hatta ait olduklarını dikkate almadan kablo taşıma aracına yerleştirmektedir. Kablo taşıma aracı dolana kadar sırayla makinelerden kesilen kabloları almaktadır. Kablo taşıma aracı dolduğunda ise araçta bulunan kabloları herhangi bir rotaya bağlı kalmaksızın hatlara dağıtmaktadır. Tüm kabloların hatlara dağıtımını tamamlandığında bir önceki turdaki en son kablo alınan makineden başlanarak

kablolar toplanarak hatlara dağıtım işlemi yapılmaktadır. Kesim Bölümü'nde bulunan 4 dağıtım operatörü bir birinden bağımsız hareket etmektedir. Bu durum 4 dağıtımının da aynı makine ve hatlara uğramasına ve zaman kayıplarına sebep olmaktadır. Ayrıca taşıma aracına kablolar asılırken herhangi bir gruplama yapılmadığı için dağıtım esnasında kablo arama ve önceki hatlara geri dönüşlere sebep olmaktadır.

4.2. Problemin Veri Seti

Uygulama kapsamında yapılan gözlemler ve değerlendirmeye alınan üretim verilerinin analiz edilmesi sonucunda aşağıdaki veriler elde edilmiştir:

- Birim kablo dağıtım süresi

Bir cm kablunun dağıtım süresi yapılan zaman etütlerine göre ortalama 2 saniye olarak hesaplanmıştır.

- Kablo taşıma aracı kapasitesi

Bir kablo taşıma aracında 20 askı kolu bulunmaktadır. Her bir askının uzunluğu 20 cm'dir. Bir taşıma aracına asılabilecek kablo miktarı toplam 400 cm'dir.

- İstasyonların talep miktarları

İstasyonların saatlik ortalama talep miktarları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. İstasyonların Talep Miktarları

İstasyon Adı	İstasyon No	Cm/saat	Askı Kol sayısı/saat
CH-Roof	I1	25	1
C-Floor	I2	37	2
CH-B-door	I3	24	1
CH-Floor	I4	261	13
C-Eng Room	I5	75	4
CH-Eng Room	I6	213	11
C-IP	I7	66	3
A-IP	I8	178	9
C-IP	I9	244	12
F- Floor	I10	108	5
F-Door	I11	28	1
F-CONT	I12	24	1
F-COMP	I13	84	4
F-IP	I14	74	4
CH-IP 2	I15	67	3
CH-Door	I16	79	4
CH-Other	I17	18	1
Hazırlık	I18	281	14
FASON	I19	53	3

- Taşıma aracı hazırlık süresi

Taşıma aracı hazırlık süresi 5 dakika olarak belirlenmiştir. Bu süre; kablo taşıma arabasının istasyonlara malzeme dağıtımını bitirip dağıtım başlangıç noktasına geldikten sonra boş arabanın yerine yerleştirilmesi, dolu olan arabanın alınması, bazı veri girişlerinin sisteme girilmesi ve beklenmedik durumlar için gereken süreyi içermektedir.

- İstasyonların iç kısımlarına girmek için gereken süre

Bazı istasyonlarda, kablo dağıtımını için iç kısımlara girme gereksinimi duyulmaktadır. Bu süre, ilgili istasyonlar için bir dakika olarak belirlenmiştir.

- İstasyonlar arası uzaklık matrisi

Depo ve istasyonlar arası uzaklıkların bir bölümü Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. İstasyonlar Arası Uzaklık Matrisi

	0	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I17	I18	I19
0	0	94	44	40	31	17	8	3	10	29	41	85	77	71	51	44	54	99	34	66
I1	94	0	47	53	64	74	84	94	102	122	132	98	90	84	63	53	38	111	58	66
I2	44	47	0	83	17	27	37	46	53	72	83	129	121	115	94	84	98	143	10	22
I3	40	53	83	0	67	57	47	39	47	67	77	44	36	30	9	2	15	58	73	105
I4	31	64	17	67	0	10	20	30	38	58	68	111	103	97	76	66	82	125	8	39
I5	17	74	27	57	10	0	10	20	27	46	58	101	93	87	66	56	71	115	16	47
I6	8	84	37	47	20	10	0	10	18	37	48	91	83	77	56	46	61	105	26	57
I7	3	94	46	39	30	20	10	0	8	28	38	81	73	67	46	40	55	95	35	66
I8	10	102	53	47	38	27	18	8	0	20	30	89	81	75	54	48	63	103	43	74
I9	29	122	72	67	58	46	37	28	20	0	10	58	66	72	74	64	82	72	60	93
I10	41	132	83	77	68	58	48	38	30	10	0	47	56	62	83	76	91	61	70	103
I11	85	98	129	44	111	101	91	81	89	58	47	0	8	14	35	45	60	14	117	150
I12	77	90	121	36	103	93	83	73	81	66	56	8	0	6	27	37	52	22	109	142
I13	71	84	115	30	97	87	77	67	75	72	62	14	6	0	21	31	46	28	103	136
I14	51	63	94	9	76	66	56	46	54	74	83	35	27	21	0	10	25	49	83	114
I15	44	53	84	2	66	56	46	40	48	64	76	45	37	31	10	0	15	59	73	104
I16	54	38	98	15	82	71	61	55	63	82	91	60	52	46	25	15	0	74	88	119
I17	99	111	143	58	125	115	105	95	103	72	61	14	22	28	49	59	74	0	131	162
I18	34	58	10	73	8	16	26	35	43	60	70	117	109	103	83	73	88	131	0	31
I19	66	66	22	105	39	47	57	66	74	93	103	150	142	136	114	104	119	162	31	0

Çalışmada aşağıdaki varsayımlar değerlendirilmeye alınmıştır:

- Yerleşim planı üzerinde değişiklik yapılmadan taşıma sistemi iyileştirilmektedir.
- İstasyonların birim zamandaki talep miktarı sabit olarak alınmıştır.
- İstasyon içi taşımalar değerlendirilmeye alınmamaktadır.
- Yürüme hızı yapılan gözlemlere göre ortalama alınarak hesaplanmıştır.
- Tüm araçlar birbirinin aynısıdır.
- Taşıma işlemini yapacak yeterli sayıda araç mevcuttur.
- Rota üzerindeki noktalar arasında yük taşınması yapılmamaktadır.

4.3. Problemin Tasarruf Algoritması İle Çözümü

Tasarruf yönteminin uygulanması için gerekli olan veriler; talep verileri, dağıtım noktalarının depoya olan uzaklıkları ve kendi aralarındaki uzaklıkları ve araç kapasiteleridir.

Tasarruf Algoritması ile çözüm için Tablo 2’de verilen uzaklık matrisine göre Tablo 3’de verilen tasarruf matrisi oluşturulmuştur. Örneğin; $S_{12} = d_{(0,1)} + d_{(2,0)} - d_{(1,2)} = 94 + 44 - 47 = 91$ olarak hesaplanır.

Aşağıda problemin Paralel Tasarruf Algoritması ile çözümü gösterilmiştir. Paralel Tasarruf Algoritması’nda, mevcut rotaya eklenemeyen istasyonlar için yeni rota açılmaktadır. Ayrıca ikililere bakılırken rotaların birleştirilip birleştirilemeyeceği de kontrol edilmektedir. Tasarruf değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanır ve tasarruf matrisi oluşturulduktan sonra, ilk olarak en büyük tasarruf olan değerden hesaplamaya başlanır. İki rota talepleri karşılandığı sürece rota birleştirmesine devam edilir. Kapasite aşıldığında, bir sonraki en yüksek tasarruf değerine geçilerek iterasyona devam edilir.

Tablo 3. Tasarruf Matrisi

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I17	I18	I19
I1																			
I2	91																		
I3	0,5	1																	
I4	61	58	3,5																
I5	37	35	0	38															
I6	18	16	1	19	15														
I7	3	1	4	3,5	0	1													
I8	2	1	3	2,5	0	0	5												
I9	1	1	2	1,5	0	0	4	19											
I10	3	2	4	3,5	0	1	6	21	60										
I11	81	0	81	4,5	1	2	7	6	56	79									
I12	81	0	81	4,5	1	2	7	6	40	62	154								
I13	81	0	81	4,5	1	2	7	6	28	50	142	142							
I14	82	1	82	5,5	2	3	8	7	6	9	101	101	101						
I15	85	4	82	8,5	5	6	7	6	9	9	84	84	84	85					
I16	110	0	79	2,5	0	1	2	1	1	4	79	79	79	80	83				
I17	82	0	81	4,5	1	2	7	6	56	79	170	154	142	101	84	79			
I18	70	68	1	57	35	16	2	1	3	5	2	2	2	2	5	0	2		
I19	94	88	1	58	36	17	3	2	2	4	1	1	1	3	6	1	3	69	

Tablo 4'te tasarruf adımlarının bir kısmı gösterilmektedir.

Tablo 4. Tasarruf Hareketleri

Konum 1	Konum 2	Tasarruf Miktarı	Talep 1	Talep 2	Toplam askı/saat	Karar
I17	I11	170	0,9	1,4	2,3	I11-I17
I12	I11	154	1,2	1,4	2,6	I12-I11-I17
I17	I12	154	0,9	1,2	2,1	Aynı Rotadalar
I13	I11	142	4,2	1,4	5,6	I13-I12-I11-I17
I13	I12	142	4,2	1,2	5,4	Aynı Rotadalar
I17	I13	142	0,9	4,2	5,1	Aynı Rotadalar
I16	I1	109,5	3,9	1,2	5,2	I13-I12-I11-I17 ve I1-I16 birleştir
I14	I11	101	3,7	1,4	5,1	I1-I16-I13-I12-I11-I17 ve I14 birleştir
I14	I12	101	3,7	1,2	4,9	Aynı Rotadalar
I14	I13	101	3,7	4,2	7,9	Aynı Rotadalar
I17	I14	101	0,9	3,7	4,6	Aynı Rotadalar
I19	I1	93,5	2,6	1,2	3,9	I1-I16-I14-I13-I12-I11-I17 ve I19 birleştir
I2	I1	90,5	1,8	1,2	3,1	Araç kapasitesini aşar
I19	I2	88	2,6	1,8	4,5	Araç kapasitesini aşar
I15	I14	85	3,4	3,7	7,1	Araç kapasitesini aşar

Bütün iterasyonların sonucunda 6 farklı rota grubu bulunmuştur. Tasarruf Algoritması'na göre elde edilen bu rota grupları En Yakın Komşu Algoritması'na göre sıralanarak uygun rotalar oluşturulmuştur. Bu rotalar ve rotaların uzunlukları aşağıdaki Tablo 5'te gösterilmiştir. Bu tabloya göre; istasyonların bir saatlik talebinin dağıtılması için kablo dağıtım operatörlerinin 695,5 metre yol yürümesi gerekmektedir.

Tablo 5. Tasarruf Yöntemi Rotalar ve Mesafe Tablosu

Rota NO	Rota	Mesafe(m)
1	I0-I14-I13-I12-I11-I17-I16-I1-I19-I0	344
2	I0-I18-I2-I0	88
3	I0-I9-I10-I0	80
4	I0-I5-I4-I0	57,5
5	I0-I7-I6-I3-I15-I0	106
6	I0-I8-I0	20

4.4. Problemin Matematiksel Model Çözümü

Problem, literatürde adı geçen KARP matematiksel modeli esas alınarak LINGO 18.0 yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Modelde 4 değişken ve 9 kısıt bulunmaktadır. LINGO 18.0 yazılımı ile optimal çözüme 21 saniyede ulaşılmıştır.

Modele ait karar değişkenleri aşağıda verilmiştir. Program kodlarının bir bölümü Şekil 3'te gösterilmiştir.

Karar Değişkenleri:

- DIST: İstasyonlar arası uzaklığı gösteren simetrik matristir.
- Q(i): i istasyonunun talep miktarlarını göstermektedir.
- VCAP: Taşıma arabasının kapasitesini göstermektedir.
- IST: Üretim hattındaki istasyonları gösterir.

```

MIN = @SUM(CXC: DIST * X);
! for each IST, except depot...;
@FOR(IST(K)| K #GT# 1:
! a vehicle does not travel inside itself...;
X(K, K) = 0;
! a vehicle must enter it...;
@SUM(IST(I)| I #NE# K #AND# (I #EQ# 1 #OR#
Q(I) + Q(K) #LE# VCAP): X(I, K)) = 1;
! a vehicle must leave it after service;
@SUM(IST(J)| J #NE# K #AND# (J #EQ# 1 #OR#
Q(J) + Q(K) #LE# VCAP): X(K, J)) = 1;
! U(K) = amount delivered on trip up to IST K
>= amount needed at K but <= vehicle capalST;
@BND(Q(K), U(K), VCAP);
! If K follows I, then can bound U(K) - U(I);
@FOR(IST(I)| I #NE# K #AND# I #NE# 1: U(K) >=
U(I) + Q(K) - VCAP + VCAP*(X(K, I) + X(I, K))
- (Q(K) + Q(I)) * X(K, I);
);
! If K is 1st stop, then U(K) = Q(K);
U(K) <= VCAP - (VCAP - Q(K)) * X(1, K);
! If K is not 1st stop...;
U(K) >=
Q(K) + @SUM(IST(I)| I #GT# 1: Q(I) * X(I, K));
);
! Make the X's binary;
@FOR(CXC(I, J): @BIN(X(I, J)););
! Must send enough vehicles out of depot;
@SUM(IST(J)| J #GT# 1: X(1, J)) >=
@FLOOR((@SUM(IST(I)| I #GT# 1: Q(I))/ VCAP) + .999);
END

```

Şekil 3. Lingo Program Kodları

Tablo 6’da matematiksel model sonucuna göre oluşturulan rotalar ve bu rotalara ait mesafeler verilmiştir. Matematiksel model çözümü ile elde edilen rotaların toplam mesafesi 691 metredir.

Tablo 6. Matematiksel Model Rotaları ve Mesafe Tablosu

Rota NO	Rota	Mesafe(m)
1	I0, I3 I15 I16 I1 I0	188,5
2	I0, I5 I4 I0	57,5
3	I0, I6 I0	16
4	I0, I7 I14 I13 I12, I11 I17 I0	197
5	I0, I8 I0	20
6	I0, I9 I10 I0	80
7	I0, I18, I2, I19 I0	132

4.5. Problemin Çözüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

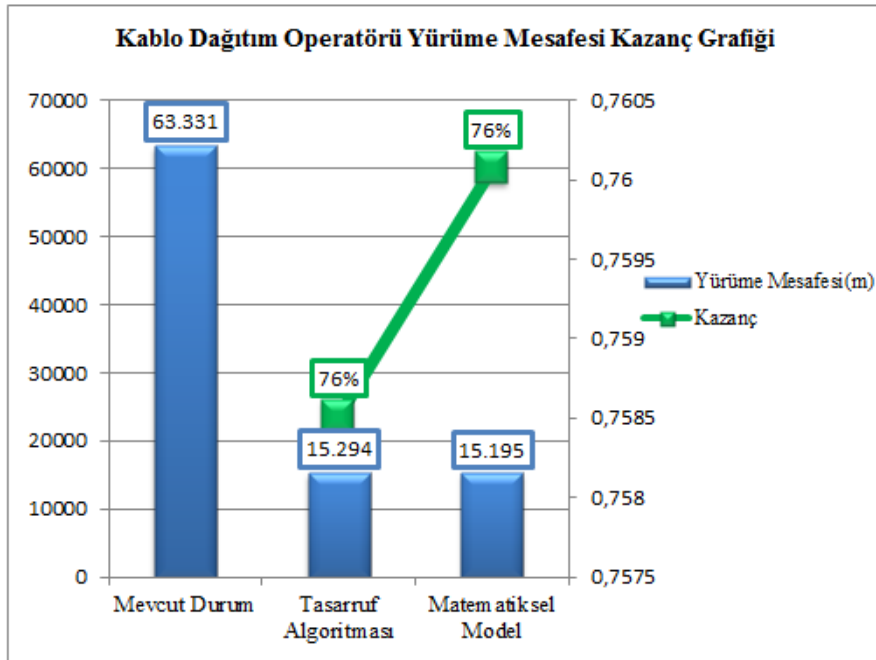
Kablo dağıtım işlemi İç Lojistik süreçlerinin iyileştirilmesi noktasında ARP olarak değerlendirilmiş ve Clarke ve Wright Tasarruf Algoritması ve KARP’ye ait matematiksel modelleme yöntemiyle çözülmüştür. Çözüm sonucunda, rotalar oluşturulmuş ve toplam yollar hesaplanmıştır.

Tablo 7’de mevcut durum ve çözüm için kullanılan iki yöntemin sonuçları karşılaştırılmıştır. Mevcut durumda kablo toplama ve kablo dağıtım işlemi için 12 operatör vardır. Bu operatörlerin günlük toplam yürüme mesafesi 63331 metredir. Bu tabloya göre günlük toplam yürüme mesafesi, Tasarruf Algoritması’na göre 15294 metre ve matematiksel modele göre 15195 metredir. Yürüme mesafesi için en iyi sonucu matematiksel model sağlamıştır. Kablo dağıtım çevrim süresi Tasarruf Algoritması ve matematiksel modelde aynı sonucu vermiştir. Ancak matematiksel modelde araç sayısı 7 olarak tespit edildiği için gerekli olan toplam operatör sayısı Tasarruf Algoritması’na göre daha yüksek çıkmıştır. En az operatör sayısını Tasarruf Algoritması sağlamıştır.

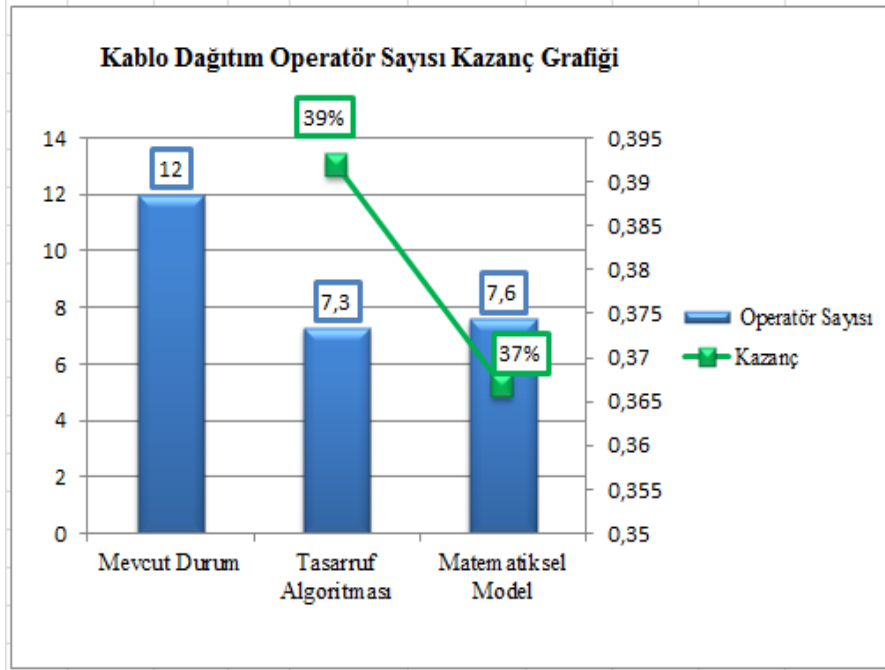
Tablo 7. Kablo Dağıtım Sistemi Problemi Çözüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

	Mevcut Durum	Tasarruf Algoritması	Matematiksel Model
Kablo dağıtım çevrim süresi (Dakika)	168	101	101
Kablo toplama çevrim süresi (Dakika)	72	12,2	12,2
Mesafe (Metre)	2880	695,5	691
Gerekli araç sayısı (Adet)	6	6	7
Günlük kablo dağıtım süresi (saat)	62	37	37
Günlük kablo toplama süresi (saat)	26	5,8	5,8
Gerekli kablo toplama operatör sayısı	3,6	0,8	0,8
Gerekli kablo dağıtım operatör sayısı	8,4	5,1	5,1
Araç hazırlık işlemi için gerekli operatör sayısı	0	1,5	1,8
Toplam operatör Sayısı	12,0	7,3	7,6
Günlük toplam yürüme mesafesi(Metre)	63331	15294	15195
Yürüme mesafesi kazanç oranı		76%	76%
Operatör sayısı kazanç oranı		39%	37%

Şekil 4'te kablo dağıtım operatörlerinin günlük toplam yürüme mesafesinin mevcut durum ile karşılaştırılması ve kazanç oranları göstermektedir. Yapılan çalışma sonucunda yürüme mesafesinde günlük %76 iyileştirme sağlanmıştır.

**Şekil 4.** Kablo Dağıtım Operatörü Yürüme Mesafesi Kazanç Grafiği

Şekil 5'te operatör sayılarının mevcut durum ile karşılaştırılması ve sağlanan kazanç gösterilmektedir. Tasarruf Algoritması, toplam operatör sayısında %39 iyileştirme sağlayarak en yüksek kazancı sağlayan yöntem olmuştur.



Şekil 5. Kablo Dağıtım Operatörü Sayısı Kazanç Grafiği

Genel olarak Tasarruf Algoritması ve matematiksel model bir birine yakın değerler vermiştir. Ancak araç sayısı matematiksel modelde 7 olarak hesaplandığı için araç hazırlığı için gereken sürede artış olmuştur. Bu nedenle operatör sayısındaki kazancın matematiksel modelde daha az olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak en iyi çözümü yürüme mesafesinde %76 iyileştirme ve operatör sayısında %39 iyileştirme sağlayan Tasarruf Algoritması olduğu görülmektedir.

Tasarruf Algoritması ile belirlenen rotalara göre taşıma araçları için Şekil 6'da gösterilen örnekteki gibi kablo yerleşim planları oluşturulmuştur. Böylece kablo taşıma aracının yerleşimi standart hale getirilmiş ve dağıtım operatörünün araçta kablo arama süresi azaltılmıştır.

Kablo Taşıma Arabası Yerleşim Planı										
ROTA 5	I0(Depo)-I7(C-IP)-I6(CH-Eng Room)-I3(CH-B-Door)-I15(CH-IP 2)-I0(Depo)									
1	2	3	4	5		11	12	13	14	15
16	16	16	16	16		16	17	17	17	17
6	7	8	9	10		16	17	18	19	20
16	16	16	16	16		115	115	115	115	13

Şekil 6. Kablo Taşıma Arabası Yerleşim Planı

5. Sonuç

Üretim sistemlerinin sürekli iyileştirilmesini amaçlayan ve bu noktada israfların azaltılmasına yönelik yöntemlerin geliştirildiği yalın üretim yaklaşımında en önemli israf kaynaklarından biri de üretim içi malzeme taşıma işlemine ilişkin yanlış uygulamalardır. Üretimle bütünleşmemiş, planlanması ve yönetilmesi zor, standardize olmayan bir malzeme taşıma yapısı, temin süresini arttırarak, işgücü ve enerji kayıplarına neden olabilmektedir (Kılıç, 2011).

İç lojistik, lojistiğin diğer bölümlerine göre üzerinde daha az durulmuş ve yöntemler geliştirilmiş bir alanıdır. İç lojistikte ana konu, üretim ortamındaki malzemelerin üretim ve tüketim noktaları arasındaki akışının tam zamanında, istenilen miktarda ve şekilde, minimum maliyetle yerine getirilmesidir (Kılıç, 2011).

Bu çalışmada, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir fabrikanın Kesim Bölümü'nde üretilen yarı mamullerin montaj hatlarına dağıtılma süreci iyileştirilmeye çalışılmıştır. Mevcut durumda kablo dağıtım rotalarının belirlenmesinde herhangi bir bilimsel yöntemin kullanılmaması ve rotaların standart hale getirilmemesi sebebiyle işgücü kayıpları oluşmaktadır.

Fabrika içi yarı mamul taşıma sisteminin iyileştirilmesi amacıyla Araç Rotalama Problemi çözüm yöntemlerinden yararlanılarak kablo dağıtım operatörünün çevrimini en kısa sürede tamamlayacağı rotalar oluşturulmuştur. Çözüm için Clarke ve Wright Tasarruf Algoritması ve Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi matematiksel modeli kullanılmıştır. Kullanılan bu yöntemlerden, kablo dağıtım operatör sayısında %39 iyileştirme sağlayan Clarke ve Wright Tasarruf Algoritması'nın en iyi çözüm olduğu görülmüştür. Tasarruf Algoritması ile belirlenen rotalara göre kablo toplama işlemi ve taşıma aracına kabloların yerleştirilmesi standart hale getirilmiştir. Elde edilen sonuçlar mevcut durum ile karşılaştırılmış ve sağlanan iyileştirmeler gösterilmiştir.

Bu bağlamda önerilen yeni sistemin kazanımları şöyledir:

- Kablo toplama ve kablo dağıtım işlemleri ayrılmıştır. Böylece operatörlerin performans takibi ve yapılan işin kontrolü kolaylaşmıştır.
- Kablo dağıtım operatörlerinin minimum yürüme mesafesi ile yapacağı rotalar belirlenmiştir. Toplam yürüme mesafesinde %76 iyileşme sağlanmıştır.
- Belirlenen rotalar kablo dağıtım operatörlerine tanımlanarak operatörlerin aynı hatlara gereksiz yere gitmesi engellenmiştir.
- Kablolar arabalara yerleştirilirken hat sırasına göre yerleştirildiği için kablo dağıtım operatörünün arabada kablo arama süresi azalmıştır.
- Yürüme ve arama sürelerinde sağlanan kazanç ile operatör sayısı azaltılmıştır. Toplam operatör sayısında %39 iyileştirme ile operatör maliyetinde kazanç sağlanmıştır.

Gelecek çalışmalarda bu çalışmada kullanılan yöntemler ile elde edilen malzeme dağıtım rotaları Genetik Algoritma Yöntemi'nin başlangıç popülasyonu olarak kullanılarak yeni dağıtım rotaları belirlenebilir. Ayrıca hat yanı stok miktarını azaltacak matematiksel modellerin geliştirilmesi de gelecekte yapılabilecek çalışma konusu olarak öngörülmektedir.

Referanslar

- Çoban, G. & Güven, T. (2011). Otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir firmada fabrika içi lojistik sürecinin iyileştirilmesi. Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Demircioğlu, M. (2009). Araç rotalama probleminin sezgisel bir yaklaşım ile çözümlenmesi üzerine bir uygulama. Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Karagöl, K., Tokat, S. & Aydemir, E. (2016). Kapasite kısıtlı araç rotalama problemlerinde başlangıç rotalarının kurulması için yeni bir algoritma. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 4(3): 215-226. Doi: 10.21923/jesd.60313
- Kılıç, H.S. (2011). Yalın üretim ortamında iç lojistik sisteminin tasarımı. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Kılıç, H.S. ve Durmuşoğlu, M.B. (2013). A mathematical model and a heuristic approach for periodic material delivery in lean production environment, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 69(5-8), 977-992. doi: 10.1007/s00170-013-5082-y.
- Kızıloğlu, K. (2017). Stokastik talepli çok depolu araç rotalama problemi için sezgisel bir çözüm yaklaşımı. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Küçüköğlü İ., Yağmahan B., Çağlıyan M., Yıldız A., Aktokluk D. (2018). İç Lojistik Sisteminde Malzeme Tedariği İçin Geliştirilmiş Matematiksel Modelleme Yaklaşımı: Bir Uygulama. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 23(4):159-175. DOI: 10.17482/uumfd.455198
- Rushton A., Croucher P. & Baker P. (2006). Handbook of Logistics and Distribution management 3rd Edition, Kogan Page, 1-665.
- Staab, T., Klenk, E., Galka, S. ve Günthner, W.A. (2016). Efficiency in in-plant milk-run systems-the influence of routing strategies on system utilization and process stability, Journal of Simulation, 10(2), 137-143. doi: 10.1057/jos.2015.6 .
- Şahin, Y. & Eroğlu, A. (2014). Kapasite kısıtlı araç rotalama problemi için metasezgisel yöntemler bilimsel yazın taraması. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 19(4): 337-355.

Şeker, Ş. (2007). Araç rotalama problemleri ve zaman pencereli stokastik araç rotalama problemine genetik algoritma yaklaşımı. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Yazgan, H. (2014). Talep ve kapasite kısıtlı optimizasyon problemi için yeni bir melez algoritma. Endüstri Mühendisliği Dergisi. 25(1): 16-28.



Adaptive Right Median Filter for Salt-and-Pepper Noise Removal

Uğur Erkan^{*1}, Levent Gökrem², Serdar Enginoğlu³

¹Computer Engineering, Engineering Faculty, Karamanoğlu Mehmetbey University, Karaman, TURKEY

²Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Tokat Gaziosmanpaşa University, Tokat, TURKEY

³Department of Mathematics, Faculty of Arts and Sciences, Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale, TURKEY

Başyuru/Received: 12/11/2018

Kabul/Accepted: 14/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Abstract

In image processing, nonlinear filters are commonly used as a pre-process for noise removal before applying any advanced processing such as classification and clustering to an image. The adaptive filters being a kind of the nonlinear filters mainly perform better than the others in salt-and-pepper noise. In this paper, we first define a new median method, i.e. right median (rm). We then define a new adaptive nonlinear filter developed via rm, namely Adaptive Right Median Filter (ARMF), for salt-and-pepper noise removal. Afterwards, we compare the results of ARMF with some of the known filters by using 12 test images and two image quality metrics: Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) and Structural Similarity (SSIM). The results show that ARMF outperforms the other methods at all the noise density except 80% and 90% in the mean percentages. Finally, we discuss the need for further research.

Key Words

“Image denoising, Noise removal, Nonlinear filters, Nonlinear functions, Matrix algebra”

1. Introduction

The image processing is an area applied to many sectors from military to movie industries (Tomasi & Manduchi, 1998; Xiong et al., 2016). With image processing methods, problems in these areas are tried to be troubleshot. These methods are realised in spatial and frequency domains (Han et al., 2015). The filter is the most basic operation of image processing and computer vision (Lee et al., 2016). One of the essential processes in the spatial domain is low or high pass filters. Before the advanced processing of the images such as classification and clustering, they are treated by these filters. What is aimed at these processes is to eliminate the undesirable features of the image as much as possible. The success of these processes directly affects other operations in obtaining quality images.

Noise removal and keeping image information such as edges, textures, and other details are also essential topics for image denoising (Erkan & Gökrem, 2018; Jiang et al., 2014; Li et al., 2015; Liu et al., 2017; Nguyen & Chun, 2017; Rafsanjani et al., 2017; Xu et al., 2017). In camera-sensors, faulty memory locations in hardware, or transmissions in a noisy channel lead to some kinds of noise such as salt-and-pepper noise (SPN) and Gaussian noise (Bai et al., 2014; Chan et al., 2005; Gellert & Brad, 2016; Xu et al., 2014). SPN substantially lowers the quality of the image and randomly sets certain pixel values in the image to the maximum or minimum value (Erkan & Kilicman, 2016; Lin et al., 2010; Sun et al., 2015; Wang et al., 2016). One of the frequently used methods to remove SPN is nonlinear filters such as Standard Median Filter (SMF) (Pratt, 1975; Tukey, 1977), Adaptive Median Filter (AMF) (Hwang & Haddad, 1995), Median Filter without Repetition (MFWR) (Erkan & Gökrem, 2017), Progressive Switching Median Filter (PSMF) (Wang & Zhang, 1999), Decision Based Filtering Algorithm (DBA) (Pattnaik et al., 2012) Modified Decision-Based Unsymmetric Trimmed Median Filter (MDBUTMF) (Esakkirajan et al., 2011), and Noise Adaptive Fuzzy Switching Median Filter (NAFSMF) (Toh & Isa, 2010).

In this paper, in Section 2, we define a new method, i.e. Adaptive Right Median Filter (ARMF), which is improved via the right median (rm), for SPN removal. In Section 3, we compare ARMF with DBA, MDBUTMF, and NAFSMF by using 12 test images via two image quality metrics: Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) and Structural Similarity (SSIM). Finally, we discuss the need for further research.

2. Preliminaries and ARMF Algorithm

In this section, firstly, we give some basic notions provided in (Erkan et al., 2018). Throughout this paper, let $A := [a_{ij}]_{m \times n}$ be an image matrix (IM) such that a_{ij} is an unsigned integer number, $0 \leq a_{ij} \leq 255$, and for at least one i and j , $a_{ij} \neq 0$ and $a_{ij} \neq 255$.

Definition 2.1 Let A be an IM. Then, a_{ij} is called a noisy entry of A if $a_{ij} = 0$ or $a_{ij} = 255$; otherwise, a_{ij} is called a regular entry of A .

Definition 2.2 Let A be an IM. Then, A is called a noise image matrix (NIM) if for some i and j , a_{ij} is a noisy entry of A .

Definition 2.3 Let A be an NIM. Then, the matrix $B := [b_{ij}]_{m \times n}$ is called the binary matrix of A where

$$b_{ij} := \begin{cases} 0, & a_{ij} \text{ is a noisy entry of } A \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Definition 2.4 Let $A := [a_{ij}]_{m \times n}$ and $t \in \{1, 2, \dots, \min\{m, n\}\}$, then the matrix $\bar{A}_{tsim} := [\bar{a}_{rs}]_{(m+2t) \times (n+2t)}$ called t -symmetric pad matrix of A is defined as follows:

$$\begin{bmatrix} a_{tt} & \dots & a_{t1} & a_{t1} & a_{t2} & \dots & a_{tn} & a_{tn} & \dots & a_{t(n-t+1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1t} & \dots & a_{11} & a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & a_{1n} & \dots & a_{1(n-t+1)} \\ a_{1t} & \dots & a_{11} & \mathbf{a_{11}} & \mathbf{a_{12}} & \dots & \mathbf{a_{1n}} & a_{1n} & \dots & a_{1(n-t+1)} \\ a_{2t} & \dots & a_{21} & \mathbf{a_{21}} & \mathbf{a_{22}} & \dots & \mathbf{a_{2n}} & a_{2n} & \dots & a_{2(n-t+1)} \\ a_{3t} & \dots & a_{31} & \mathbf{a_{31}} & \mathbf{a_{32}} & \dots & \mathbf{a_{3n}} & a_{3n} & \dots & a_{3(n-t+1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{mt} & \dots & a_{m1} & \mathbf{a_{m1}} & \mathbf{a_{m2}} & \dots & \mathbf{a_{mn}} & a_{mn} & \dots & a_{m(n-t+1)} \\ a_{mt} & \dots & a_{m1} & a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} & a_{mn} & \dots & a_{m(n-t+1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{(m-t+1)t} & \dots & a_{(m-t+1)1} & a_{(m-t+1)1} & a_{(m-t+1)2} & \dots & a_{(m-t+1)n} & a_{(m-t+1)n} & \dots & a_{(m-t+1)(n-t+1)} \end{bmatrix}$$

Example 2.1 Let $A = \begin{bmatrix} 11 & 0 & 13 \\ 255 & 22 & 23 \\ 31 & 32 & 0 \end{bmatrix}$. Then,

$$\bar{A}_{2sim} = \begin{bmatrix} 22 & 255 & 255 & 22 & 23 & 23 & 22 \\ 0 & 11 & 11 & 0 & 13 & 13 & 0 \\ 0 & 11 & \mathbf{11} & \mathbf{0} & \mathbf{13} & 13 & 0 \\ 22 & 255 & \mathbf{255} & \mathbf{22} & \mathbf{23} & 23 & 22 \\ 32 & 31 & \mathbf{31} & \mathbf{32} & \mathbf{0} & 0 & 32 \\ 32 & 31 & 31 & 32 & 0 & 0 & 32 \\ 22 & 255 & 255 & 22 & 23 & 23 & 22 \end{bmatrix}_{7 \times 7}$$

Definition 2.5 Let $A := [a_{ij}]_{m \times n}$, \bar{A}_{tsim} be a *tsim*-pad matrix of A and $k \in \{1, 2, \dots, t\}$. Then, the matrix, denoted by A_{ij}^k ,

$$\begin{bmatrix} \bar{a}_{(i+t-k)(j+t-k)} & \cdots & \bar{a}_{(i+t-k)(j+t+k)} \\ \vdots & \bar{a}_{(i+t)(j+t)} & \vdots \\ \bar{a}_{(i+t+k)(j+t-k)} & \cdots & \bar{a}_{(i+t+k)(j+t+k)} \end{bmatrix}_{(2k+1) \times (2k+1)}$$

is called k -approximate matrix of a_{ij} in \bar{A}_{tsim} .

Example 2.2 Let us consider Example 2.1. Then,

$$A_{21}^1 = \begin{bmatrix} 11 & 11 & 0 \\ 255 & 255 & 22 \\ 31 & 31 & 32 \end{bmatrix}$$

Definition 2.6 If all entries of a matrix are zero, then it is called a zero matrix and is denoted by $[0]$.

Secondly, we give two basic notions needed for ARMF.

Definition 2.7 Let A be an NIM, R be the nonempty set of all regular entries of A , and $|R|$ denote the cardinality of R . Then, the matrix $\vec{A} := [\vec{a}_{1w}]_{1 \times |R|}$ is called strictly increasing regular entry matrix (SIREM) of A , where

$$\vec{a}_{1w} := \begin{cases} \min R, & w = 1 \\ \min(R \setminus \{\vec{a}_{11}, \vec{a}_{12}, \dots, \vec{a}_{1(w-1)}\}), & 1 < w \leq |R| \end{cases}$$

Definition 2.8 Let $\vec{A} := [\vec{a}_{1w}]_{1 \times |R|}$ be SIREM of A . Then, the value

$$rm\vec{A} := \begin{cases} \vec{a}_{1(\frac{|R|+1}{2})}, & |R| \text{ is odd} \\ \vec{a}_{1(\frac{|R|+2}{2})}, & |R| \text{ is even} \end{cases}$$

is called right median of \vec{A} .

Example 2.3 Let us consider Example 2.1. Then, $\vec{A}_{21}^1 = [11 \quad 22 \quad 31 \quad 32]$ and $rm\vec{A} = 31$.

Finally, we give ARMF which is a new adaptive method for salt-and-pepper noise removal. In this method, a NIM is considered, and its binary matrix is obtained. After that, t -symmetric pad matrices of these matrices are constructed. If an entry of the binary matrix is equal to zero and its 1-approximate matrix differs from zero matrices, then SIREM of the 1-approximate matrix is obtained, and the right median is evaluated. Afterwards, this right median is overwritten to the entry. If an entry of the binary matrix is equal to zero and its 1-approximate matrix is zero matrices, but the 2-approximate matrix of this entry differs from zero matrices, then SIREM of 2-approximate matrix is obtained, and the right median is evaluated. Afterwards, this right median is overwritten to the entry. Similarly, if an entry of the binary matrix is equal to zero and its $(k - 1)$ -approximate matrix is zero matrix but the k -approximate matrix of this entry differs from zero matrix, then SIREM of the k -approximate matrix is obtained, and the right median is evaluated. Afterwards, this right median is overwritten to the entry. Algorithm steps of this method are as follows:

ARMF Algorithm Steps

Step 1. Let $A := [a_{ij}]_{m \times n}$ be a NIM such that $\min\{m, n\} \geq 3$.

Step 2. Write the binary matrix $B := [b_{ij}]_{m \times n}$ of A .

Step 3. Write $\bar{A}_{t_{sim}}$ and $\bar{B}_{t_{sim}}$ such that $t = \min\{m, n\}$.

Step 4. For all i and j ,

If $b_{ij} = 0$

$k := 1$

While $k > 0$

If $[b_{ij}^k] \neq [0]$, then

a. Obtain \vec{A}_{ij}^k

b. Evaluate $rm\vec{A}_{ij}^k$

c. Set $a_{ij} \leftarrow rm\vec{A}_{ij}^k$

d. Break

Else

$k := k + 1$

Else

Keep the value of a_{ij}

3. Algorithms Results

In this section, we first determine 12 test images shown in Fig 1. The first four of these images are among the most popular images. The second four of them are from TID2013 (Ponomarenko et al., 2015), and the last four of them are randomly extracted from TESTIMAGES database (Asuni & Giachetti, 2014). We then give the PSNR and SSIM results of DBA, MDBUTMF, NAFSMF, and ARMF shown in Fig 2 for Baboon, Motocross, and Billiard-Balls images with 30%, 50%, and 70% SPN densities, respectively. The results show that ARMF performs better than other methods.

Afterwards, in Table 1 and 2, we give the results of the methods, for Cameraman, Lena, Baboon, and Peppers images ranging in noise densities from 10% to 90%. Moreover, in Table 3 and 4, we give the mean results of the methods for 12 test images. The results show that ARMF performs better than the others at all the noise density except 80% and 90% in the mean percentages. Here, PSNR is defined by

$$PSNR := 10 \log \left(\frac{255^2}{MSE} \right)$$

where MSE stands for the Mean Square Error and is defined by

$$MSE := \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (e_{ij} - f_{ij})^2$$

such that $E := [e_{ij}]$ is the earliest form/original image and $F := [f_{ij}]$ is the final form/corrupted image. And Structural Similarity (SSIM) (Wang et al., 2004) is defined by

$$SSIM(x, y) := \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1) + (2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1) + (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}$$

where $\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y$, and σ_{xy} are the average intensities, standard deviations and cross-covariance for images x and y , respectively. In addition, $C_1 := (K_1L)^2$ and $C_2 := (K_2L)^2$ are two constants such that $K_1 = 0.01$, $K_2 = 0.03$, and $L = 255$ for 8-bit grayscale images.

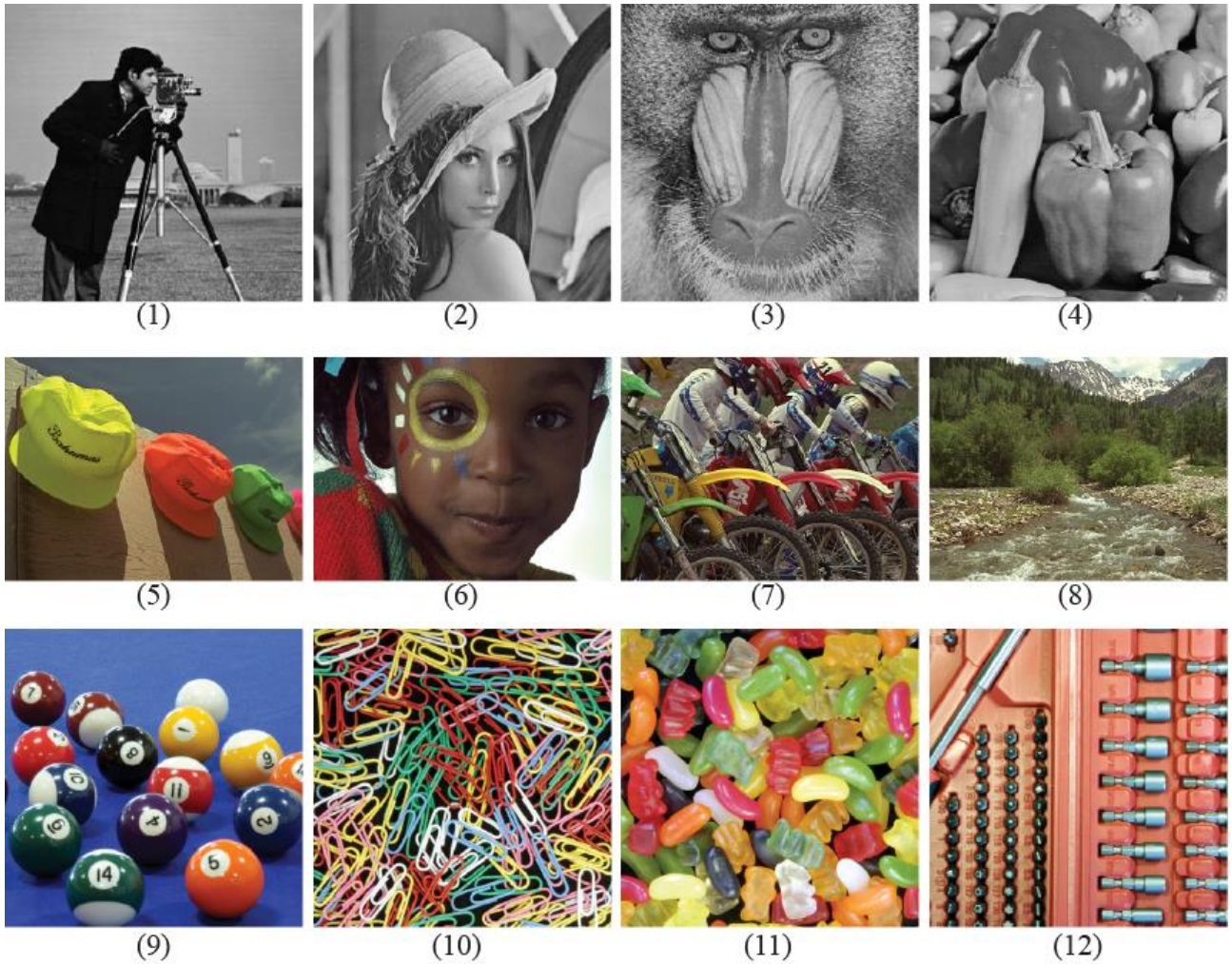


Fig 1. 12 test images: (1-4) from classic test images, (5-8) from TID2013, (9-12) from TESTIMAGES Database.

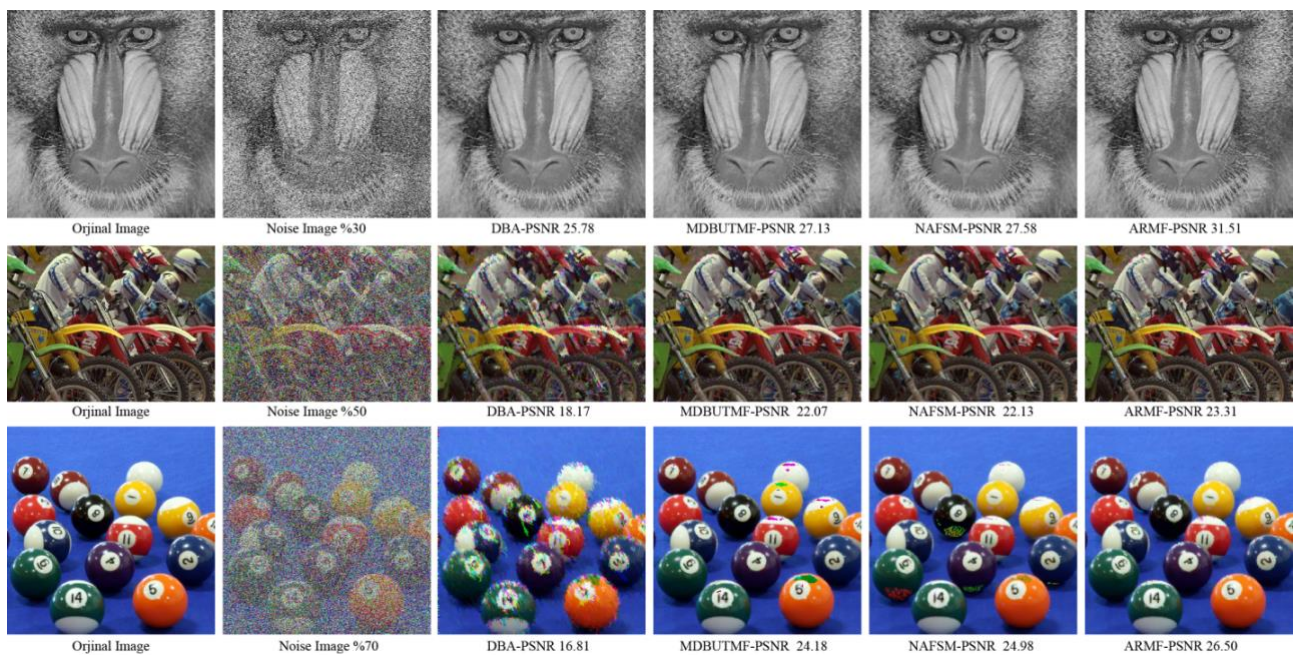


Fig. 2. PSNR results of the methods for Baboon, Motocross, and Billiard-Ball images with 30%, 50%, and 70% SPN densities, respectively.

Table 1. PSNR results the methods for some images

Image	Filter	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Cameraman	DBA	37.87	32.79	28.81	25.98	23.07	20.85	18.26	15.60	13.17
	MDBUTMF	35.30	30.99	29.27	29.77	30.25	29.39	27.81	23.59	15.10
	NAFSMF	36.91	33.96	31.84	30.50	29.49	28.33	27.00	25.57	22.36
	ARMF	42.78	38.76	35.89	33.78	31.88	29.55	27.49	24.68	20.48
Lena	DBA	37.78	33.51	29.84	27.12	24.45	21.87	19.31	16.12	13.21
	MDBUTMF	36.13	32.04	30.35	30.86	31.05	30.36	28.74	24.29	15.54
	NAFSMF	38.89	35.74	33.64	32.33	31.04	29.87	28.81	27.12	23.53
	ARMF	42.10	38.68	36.26	34.25	32.59	30.62	28.54	25.99	21.78
Baboon	DBA	33.29	29.01	25.78	23.52	21.56	19.82	18.21	16.54	13.76
	MDBUTMF	30.87	28.61	27.13	26.62	26.00	25.14	24.02	21.61	14.84
	NAFSMF	32.43	29.39	27.58	26.35	25.29	24.34	23.46	22.49	20.52
	ARMF	37.60	33.96	31.51	29.70	27.85	26.17	24.39	22.51	20.04
Peppers	DBA	36.63	32.64	29.51	26.75	24.06	21.11	18.65	15.52	11.94
	MDBUTMF	35.77	31.68	30.13	30.66	31.03	30.59	28.70	24.70	15.61
	NAFSMF	39.48	36.39	34.49	32.90	31.53	30.46	29.04	27.28	23.68
	ARMF	40.40	37.06	34.83	33.45	31.74	30.13	27.97	25.29	20.35
Mean	DBA	36.39	31.98	28.48	25.84	23.28	20.91	18.60	15.94	13.01
	MDBUTMF	34.51	30.82	29.21	29.47	29.58	28.87	27.31	23.54	15.27
	NAFSMF	36.92	33.87	31.88	30.52	29.33	28.25	27.07	25.61	22.52
	ARMF	40.72	37.11	34.62	32.79	31.01	29.11	27.09	24.61	20.66

Table 2. SSIM results the methods for some images

Image	Filter	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Cameraman	DBA	0.9881	0.9656	0.9309	0.8808	0.8123	0.7381	0.6589	0.5771	0.4738
	MDBUTMF	0.9488	0.8355	0.7749	0.8268	0.9012	0.9179	0.8959	0.7904	0.4078
	NAFSMF	0.9798	0.9637	0.9496	0.9346	0.9178	0.8991	0.8754	0.8326	0.7123
	ARMF	0.9955	0.9896	0.9821	0.9720	0.9562	0.9345	0.9018	0.8413	0.7323
Lena	DBA	0.9758	0.9414	0.8937	0.8308	0.7530	0.6625	0.5615	0.4486	0.3567
	MDBUTMF	0.9541	0.8691	0.8132	0.8442	0.8834	0.8834	0.8516	0.7386	0.3263
	NAFSMF	0.9836	0.9664	0.9484	0.9278	0.9058	0.8804	0.8486	0.8041	0.6813
	ARMF	0.9894	0.9770	0.9630	0.9459	0.9259	0.8991	0.8607	0.8041	0.6843
Baboon	DBA	0.9678	0.9148	0.8291	0.7234	0.6024	0.4672	0.3538	0.2559	0.1882
	MDBUTMF	0.9382	0.8795	0.8298	0.8186	0.8048	0.7682	0.7095	0.5964	0.2871
	NAFSMF	0.9618	0.9208	0.8767	0.8311	0.7794	0.7212	0.6541	0.5720	0.4443
	ARMF	0.9876	0.9714	0.9504	0.9236	0.8845	0.8315	0.7518	0.6337	0.4554
Peppers	DBA	0.9578	0.9098	0.8523	0.7853	0.7032	0.6018	0.5072	0.3915	0.2747
	MDBUTMF	0.9411	0.8457	0.7862	0.8121	0.8481	0.8448	0.8070	0.7070	0.3431
	NAFSMF	0.9783	0.9558	0.9337	0.9094	0.8817	0.8542	0.8177	0.7668	0.6519
	ARMF	0.9802	0.9586	0.9358	0.9125	0.8841	0.8514	0.8074	0.7422	0.6006
Mean	DBA	0.9724	0.9329	0.8765	0.8051	0.7177	0.6174	0.5203	0.4183	0.3234
	MDBUTMF	0.9455	0.8574	0.8010	0.8254	0.8594	0.8536	0.8160	0.7081	0.3411
	NAFSMF	0.9759	0.9517	0.9271	0.9007	0.8712	0.8387	0.7990	0.7439	0.6225
	ARMF	0.9882	0.9741	0.9578	0.9385	0.9127	0.8791	0.8304	0.7553	0.6181

Table 3. Mean PSNR results of the methods for 12 test images

Noise Density	DBA	MDBUTMF	NAFSMF	ARMF
10%	34.02	27.96	33.20	36.82
20%	29.94	25.87	30.70	33.97
30%	26.73	24.83	28.98	31.72
40%	24.02	24.82	27.63	29.95
50%	21.51	24.68	26.44	28.30
60%	19.10	24.05	25.39	26.60
70%	16.86	22.93	24.24	24.51
80%	14.35	20.45	22.88	22.16
90%	11.82	14.50	20.19	18.42

Table 4. Mean SSIM results of the methods for 12 test images

Noise Density	DBA	MDBUTMF	NAFSMF	ARMF
10%	0.9704	0.9338	0.9697	0.9836
20%	0.9285	0.8367	0.9455	0.9692
30%	0.8691	0.7782	0.9203	0.9515
40%	0.7911	0.8063	0.8947	0.9306
50%	0.6963	0.8458	0.8652	0.9026
60%	0.5911	0.8402	0.8324	0.8656
70%	0.4810	0.8003	0.7917	0.8121
80%	0.3736	0.6924	0.7347	0.7281
90%	0.2926	0.3455	0.6099	0.5752

4. Conclusion

In this study, we have proposed a new filter ARMF to remove the SPN. We then have shown that ARMF outperforms DBA, MDBUTMF, and NAFSMF methods at all the noise densities except 80% and 90% noise density in the mean percentages. ARMF uses an adaptive window size and enlarges the window size until the conditions in the algorithm are satisfied. In high-noise density, the regular entries in the windows with high-size may be too far away from the centre pixel. Therefore, ARMF has a drawback in the event that the noise densities bigger than 80%. It is an open question whether it is possible to improve the noise removal success of ARMF in SPNs with the high-density by limiting the window size like in NAFSMF.

References

- Asuni, N., & Giachetti, A. (2014). TESTIMAGES: a large-scale archive for testing visual devices and basic image processing algorithms. In A. Giachetti (Ed.), *Smart Tools and Apps for Graphics - Eurographics Italian Chapter Conference*. The Eurographics Association. <https://doi.org/10.2312/stag.20141242>
- Bai, T., Tan, J., Hu, M., & Wang, Y. (2014). A novel algorithm for removal of salt and pepper noise using continued fractions interpolation. *Signal Processing*. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2014.03.023>
- Chan, R. H., Ho, C. W., & Nikolova, M. (2005). Salt-and-pepper noise removal by median-type noise detectors and detail-preserving regularization. *IEEE Transactions on Image Processing*. <https://doi.org/10.1109/TIP.2005.852196>
- Erkan, U., & Gökrem, L. (2017). Median filter without repetition in salt and pepper noise. *Gaziosmanpasa Journal of Scientific Research*, 6(2), 11-19. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/download/article-file/326397>
- Erkan, U., & Gökrem, L. (2018). A new method based on pixel density in salt and pepper noise removal. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. <https://doi.org/10.3906/elk-1705-256>

- Erkan, U., Gökrem, L., & Enginoğlu, S. (2018). Different applied median filter in salt and pepper noise. *Computers and Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.01.019>
- Erkan, U., & Kiliçman, A. (2016). Two new methods for removing salt-and-pepper noise from digital images. *ScienceAsia*. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2016.42.028>
- Esakkirajan, S., Veerakumar, T., Subramanyam, A. N., & PremChand, C. H. (2011). Removal of high density salt and pepper noise through modified decision based unsymmetric trimmed median filter. *IEEE Signal Processing Letters*. <https://doi.org/10.1109/LSP.2011.2122333>
- Gellert, A., & Brad, R. (2016). Context-based prediction filtering of impulse noise images. *IET Image Processing*, 10(6), 429–437. <https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2015.0702>
- Han, J., Yue, J., Zhang, Y., & Bai, L. (2015). Local sparse structure denoising for low-light-level image. *IEEE Transactions on Image Processing*. <https://doi.org/10.1109/TIP.2015.2447735>
- Hwang, H., & Haddad, R. A. (1995). Adaptive Median Filters: New algorithms and results. *IEEE Transactions on Image Processing*. <https://doi.org/10.1109/83.370679>
- Jiang, J., Zhang, L., & Yang, J. (2014). Mixed noise removal by weighted encoding with sparse nonlocal regularization. *IEEE Transactions on Image Processing*. <https://doi.org/10.1109/TIP.2014.2317985>
- Lee, G. S., Lee, S. H., Kim, G. O., Park, J. H., & Park, Y. S. (2016). A modified GrabCut using a clustering technique to reduce image noise. *Symmetry*. <https://doi.org/10.3390/sym8070064>
- Li, Z., Zheng, J., Zhu, Z., Yao, W., & Wu, S. (2015). Weighted guided image filtering. *IEEE Transactions on Image Processing*. <https://doi.org/10.1109/TIP.2014.2371234>
- Lin, C. H., Tsai, J. S., & Chiu, C. Te. (2010). Switching bilateral filter with a texture/noise detector for universal noise removal. *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2010.5495475>
- Liu, X., Jing, X. Y., Tang, G., Wu, F., & Ge, Q. (2017). Image denoising using weighted nuclear norm minimization with multiple strategies. *Signal Processing*. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2017.01.003>
- Nguyen, M. P., & Chun, S. Y. (2017). Bounded self-weights estimation method for non-local means image denoising using minimax estimators. *IEEE Transactions on Image Processing*. <https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2658941>
- Pattnaik, A., Agarwal, S., & Chand, S. (2012). A new and efficient method for removal of high density salt and pepper noise through cascade decision based filtering algorithm. *Procedia Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.10.014>
- Ponomarenko, N., Jin, L., Ieremeiev, O., Lukin, V., Egiazarian, K., Astola, J., ..., & Jay Kuo, C. C. (2015). Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives. *Signal Processing: Image Communication*. <https://doi.org/10.1016/j.image.2014.10.009>
- Pratt, W. K., (1975). *Semiannual Technical Report*. Image Processing Institute, University of Southern California.
- Rafsanjani, H. K., Sedaaghi, M. H., & Saryazdi, S. (2017). An adaptive diffusion coefficient selection for image denoising. *Digital Signal Processing: A Review Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2017.02.004>
- Sun, C., Tang, C., Zhu, X., Li, X., & Wang, L. (2015). An efficient method for salt-and-pepper noise removal based on shearlet transform and noise detection. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*. <https://doi.org/10.1016/j.aue.2015.09.007>
- Toh, K. K. V., & Isa, N. A. M. (2010). Noise adaptive fuzzy switching median filter for salt-and-pepper noise reduction. *IEEE Signal Processing Letters*. <https://doi.org/10.1109/LSP.2009.2038769>
- Tomasi, C., & Manduchi, R. (1998). Bilateral filtering for gray and color images. *Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No.98CH36271)*, 839–846. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1998.710815>
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7976-6>

- Wang, Y., Wang, J., Song, X., & Han, L. (2016). An efficient adaptive fuzzy switching weighted mean filter for salt-and-pepper noise removal. *IEEE Signal Processing Letters*. <https://doi.org/10.1109/LSP.2016.2607785>
- Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>
- Wang, Z., & Zhang, D. (1999). Progressive switching median filter for the removal of impulse noise from highly corrupted images. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*. <https://doi.org/10.1109/82.749102>
- Xiong, R., Liu, H., Zhang, X., Zhang, J., Ma, S., Wu, F., & Gao, W. (2016). Image denoising via bandwise adaptive modeling and regularization exploiting nonlocal similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*. <https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2614160>
- Xu, J., Wang, L., & Shi, Z. (2014). A switching weighted vector median filter based on edge detection. *Signal Processing*. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.11.035>
- Xu, S., Yang, X., & Jiang, S. (2017). A fast nonlocally centralized sparse representation algorithm for image denoising. *Signal Processing*. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.08.006>



A Mixed Integer Linear Programming Model for Finding Optimum Operating Conditions of Experimental Design Variables Using Computer-Aided Optimal Experimental Designs

Akın Özdemir*¹

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bayburt University, 69000 Bayburt, TURKEY

Başvuru/Received: 14/11/2018

Kabul/Accepted: 14/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Abstract

Computer-aided optimal experimental designs are an effective quality improvement tool that provides insights of information under various quality engineering problems. In the literature, considerable attention has been focused on maximizing the determinant of the information matrix in order to generate optimal design points. However, minimizing the average prediction based on the *I*-optimality criterion is more useful than commonly used *D*-optimality criterion for a number of situations. In this paper, special experimental design situations are explored where both qualitative and quantitative input variables are considered for an irregular design space with the pre-specified number of design points and the first-order polynomial model. In addition, this paper lays out the algorithmic foundations for the proposed *D*- and *I*-optimality criteria embedded mixed integer linear programming models in order to obtain optimal operating conditions using the first-order response functions. Comparative studies are also conducted. The results show that the proposed model for the *D*-optimality is able to identify approximately 30% smaller standard deviation value than the traditional counterpart. The proposed model for the *I*-optimality also provides a feasible solution whereas there is no optimum solution for the traditional counterpart.

Key Words

“Quality by design, computer-aided design, optimum operating condition, mixed integer linear programming, optimization”

Nomenclature

$\hat{\mu}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$: Response function of the process mean
$\hat{\mu}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) - \tau$: The process bias
n	: A total number of experimental design points
n_a	: Additional experimental design points
n_n	: Necessary experimental design points
LB	: Lower bound
LSL	: Lower specification limit
$\hat{\sigma}^2(\mathbf{x}, \mathbf{z})$: Response function of the process variance
$\hat{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$: Response function of the process standard deviation
s_u	: The u^{th} run for the process standard deviation where $u=1, 2, \dots, n$
s_u^2	: The u^{th} run for the process variance where $u=1, 2, \dots, n$
τ	: The desired target value
UB	: Upper bound
USL	: Upper specification limit
(\mathbf{x}, \mathbf{z})	: A vector of both real-valued and qualitative input variables
x_i^*	: The i^{th} real-valued input variable where $i=1, 2, \dots, l$
Y	: Response variable
\bar{y}_u	: The u^{th} mean value where $u=1, 2, \dots, n$
$z_j^{q_v^*}$: The j^{th} indicator variable for the different levels of the v^{th} qualitative input variable where $j=1, 2, \dots, m$

1. INTRODUCTION

The design of experiments is an effective continuous quality improvement tool in developing new processes, providing insights of the variation of information under various conditions, and enhancing process performance, including the variance reduction. For a number of practical situations, optimal design criteria may allow the best experimental design schemes to be generated based on the decision maker's choices while the experimental design region is subject to physical restrictions and constraints using both qualitative and quantitative factors in production processes.

Computer-aided optimal experimental designs has been in the quality engineering literature for many years. The first study of the field of computer-aided optimal experimental design was conducted for prediction purposes by Smith (1918). Later, Wald (1943) introduced the D -optimality criterion. This criterion defines maximizing the determinant of the information matrix. Then, Kiefer and Wolfowitz (1959) proposed computational methods in order to find optimal experimental design points. Along the same lines, John and Draper (1975) provided brief reviews of the procedures of D -optimal experimental designs. In addition, Cook and Nachtsheim (1980) reviewed the algorithms in order to generate D -optimal experimental designs. On the contrary, Box and Draper (1959) was offered the I -optimality criterion. This criterion focuses on the integrated variance function over a studied design region. Draper (1982), Borkowski (2003) and Allen and Tseng (2011) conducted the further studies in the context of the I -optimality criterion. Furthermore, Toro Diaz et al. (2012) and Myers et al. (2016) reviewed the existing studies and provided theoretical aspects of computer-aided optimal experimental designs.

For optimization of design variables, Vining and Myers (1990) studied one of the first research attempt using a dual response model for quantitative input variables. Further, Del Castillo and Montgomery (1993) improved the dual response model. On the other hand, Lin and Tu (1995) proposed a mean-squared error model in order to enhance an optimum solutions of design variables. Copeland and Nelson (1996) conducted the further improvement of the MSE model. Furthermore, Steinberg and Bursztyn (1998), Robinson et al. (2004), Park et al. (2006) and Arvidsson and Gremyr (2008) provided comprehensive reviews of optimization models of design variables. Recent studies were conducted by Ozdemir and Cho (2016, 2017), Lu et al. (2017) and Chatterjee et al. (2018).

This paper was organized as follows. Research motivation and scope are presented in Section 2. The proposed model development methodology for the D - and I -optimality criteria is presented in Section 3 with a detailed description of each step. Then, a numerical example is performed in Section 4. Finally, concluding remarks and future studies are drawn in Section 5.

2. RESEARCH MOTIVATION AND SCOPE

There are no standard response surface designs, such as the traditional central composite designs and Box-Behnken designs, which are not suitable to exactly fit in irregular experimental design spaces. In addition, it is believed that a mixed integer linear programming (MILP) model to solve optimal experimental designs embedded robust design problems has not been adequately addressed in the literature in finding robust solutions for both qualitative and quantitative input variables. In this paper, a MILP model is formulated to solve an optimization problem based on optimal experimental designs, which can efficiently provide optimal operating conditions in irregular design spaces. The main purpose of this paper is five-fold. One, the design space may be

constrained due to the physical infeasibility, safety concerns based constraints, and resource limitations. Therefore, optimal designs are suitable alternatives to conduct experimental designs under constrained design spaces. In addition, the *D*-optimality criterion works well in order to estimate model parameters while maximizing the determinant of the information matrix. On the other hand, the *I*-optimality criterion addresses prediction variance to generate a measure of prediction performance. Two, there are some special knowledge for some practical situations, such as the potential application of convex hull about the process being studied that may offer a nonstandard model. In these situations, optimal designs are effective to estimate or predict nonstandard model parameters with minimum variance and without experimental bias. Three, it may be desired to reduce the number of design points due to resource limitations and cost considerations. Therefore, the number of design points can be reduced with the *D*- and *I*-optimality criteria. Fractional factorial designs may be considered in order to reduce the number of observations for quantitative input variables; however, they may not be effective for second-order or nonstandard models. Four, traditional experimental designs may not be longer effective while considering both quantitative and qualitative input variables, especially more than two coded levels of qualitative input variables. Thus, this limitation may be eliminated using optimal experimental designs. Five, this paper lays out the theoretical foundation for transmitting the *D*- and *I*-optimality criteria into a MILP model in order to obtain optimum operating conditions.

3. METHODOLOGY DEVELOPMENT

The proposed methodology development consists of three main phases: (1) Experimental design selection phase, (2) modelling phase, and (3) optimization phase.

3.1. Experimental Design Selection Phase

Traditional response surface designs are not appropriate while dealing with an irregular design region. In this paper, the *D*- and *I*-optimality criteria are the alternatives. The *D*-optimality criterion is based on the following notion as follows:

$$D\text{-optimality} = \max \det[\mathbf{X}'\mathbf{X}] \tag{1}$$

where $[\mathbf{X}'\mathbf{X}]$ is the information matrix. Additionally, the *D*-optimality criterion is the best alternative to estimate model parameters while maximizing the determinant of the information matrix. On the contrary, the *I*-optimality criterion is based on prediction variance to produce a measure of prediction performance through an averaging process over the region of interest *R* as follows:

$$\begin{aligned} \min_{\zeta} \int_R V[\mathbf{x}, \mathbf{z}] d[\mathbf{x}, \mathbf{z}] / \int_R d[\mathbf{x}, \mathbf{z}] \\ \Rightarrow \min_{\zeta} \int_R n[\mathbf{x}, \mathbf{z}]^{(m)'} (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} [\mathbf{x}, \mathbf{z}]^{(m)} d[\mathbf{x}, \mathbf{z}] / \int_R d[\mathbf{x}, \mathbf{z}] \end{aligned} \tag{2}$$

where $V[\mathbf{x}, \mathbf{z}] = n[\mathbf{x}, \mathbf{z}]^{(m)'} (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} [\mathbf{x}, \mathbf{z}]^{(m)}$.

3.2. Modelling Phase

In general, a low-order polynomial model is a suitable choice for many cases (Myers et al., 2016). In this paper, a first-order polynomial model is used. A general formula of the first-order model is denoted for both qualitative and quantitative input variables as follows:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^l \beta_i x_i + \sum_{j=1}^m z_j^{q_j} \varphi_j^{q_j} \tag{3}$$

where β_0 is the intercept, and β_i and φ_j represent regression coefficients of quantitative and qualitative input variables, respectively. Along the same lines, the fitted mean response function is found by

$$\begin{aligned} \hat{\mu}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) &= \mathbf{X}(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\bar{\mathbf{y}} \\ \text{where } \mathbf{X} &= \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{l1} & z_{11}^{q_1} & z_{21}^{q_1} & \cdots & z_{m1}^{q_1} & \cdots & z_{11}^{q_v} & z_{21}^{q_v} & \cdots & z_{m1}^{q_v} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{l2} & z_{12}^{q_1} & z_{22}^{q_1} & \cdots & z_{i2}^{q_1} & \cdots & z_{12}^{q_v} & z_{22}^{q_v} & \cdots & z_{i2}^{q_v} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1l} & x_{2l} & \cdots & x_{ll} & z_{1l}^{q_1} & z_{2l}^{q_1} & \cdots & z_{im}^{q_1} & \cdots & z_{1l}^{q_v} & z_{2l}^{q_v} & \cdots & z_{im}^{q_v} \end{pmatrix} \text{ and } \bar{\mathbf{y}} = [y_1, y_2, \dots, y_n]' \end{aligned} \tag{4}$$

In addition, the fitted standard deviation and variance response functions are

$$\hat{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{X}(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\mathbf{s} \text{ where } \mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_n]' \tag{5}$$

$$\hat{\sigma}^2(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{X}(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\mathbf{s}^2 \text{ where } \mathbf{s}^2 = [s_1^2, s_2^2, \dots, s_n^2]' \tag{6}$$

3.3. Optimization Phase

One of the important goals in quality engineering problems is to minimize the process variance. Therefore, the objective function of the proposed MILP model is to minimize the process variance for quality improvement. The proposed model is subject to five constraints. The first constraint is related to the process mean requirements in order to provide the customer’s satisfaction for the process. The second constraint is non-negative variance to prevent meaningless results. The third constraint is defined an indicator variable for levels of qualitative input variables. The design region is irregular; therefore, the fourth constraint is based on the non-standard design region. The last constraint is related to boundary requirements for both qualitative and quantitative input variables. Table 1 shows the proposed MILP model.

Table 1. Proposed MILP model

Objective	$\min \hat{\sigma}^2(\mathbf{x}, \mathbf{z})$
Subject to	Constraints: (1) Process mean requirements: $LSL \leq \hat{\mu}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \leq USL$ (2) Non-negative variance: $\hat{\sigma}^2(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \geq 0$ (3) Indicator variable: $\sum_{j=1}^m z_j^{q_v} \leq 1$ for $j = 1, 2, \dots, m$ (4) Non-standard design region: $h_u(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \leq L_u$ for $u = 1, 2, \dots, k$ (5) Bounds for both real-valued and qualitative input variables: $LB_i \leq x_i \leq UB_i$ for $x_i \in R$ and $i = 1, 2, \dots, l$ $z_j^{q_v} \in \{0, 1\}$ and $j = 1, 2, \dots, m$
Approach	A branch-and-cut solution technique
Find	Optimal robust solution for x_i^* and $z_j^{q_v,*}$

In Table 1, the proposed MILP model can be solved over the polyhedra and an optimal operating condition exists at the extreme point of the solution space if the optimization problem is feasible. In the ideal case, each extreme point is an integer point, so an integer linear programming model can be solved. Therefore, the geometric aspect of compact sets plays a significant role to obtain robust solutions to proposed MILP model. It is then defined as the convex hull of the feasible experimental design space, $conv(X)$, as follows:

$$conv(X) = \left\{ \mathbf{x}, \mathbf{z} \left| \begin{array}{l} \mathbf{x}, \mathbf{z} = \sum_{i=1}^l \lambda_i x_i + \sum_{j=1}^m \pi_j z_j^{q_v}, \sum_{i=1}^l \lambda_i + \sum_{j=1}^m \pi_j = 1, \sum_{i=1}^l \lambda_i \geq 0, \sum_{j=1}^m \pi_j \geq 0 \\ \text{for } i = 1, 2, \dots, l \text{ and } j = 1, 2, \dots, m \end{array} \right. \right\} \tag{7}$$

In addition, two proposed propositions are expressed to the proposed MILP optimization as follows:

Proposition 1. $conv(X)$ is a polyhedron for the proposed MILP optimization model.

Proof. The fitted response functions of the mean and variance in the proposed MILP optimization are linear due to the first-order polynomial model. In addition, the extreme points are at the corner points because all constraints in the optimization model are linear. Therefore, the convex hull should be a polyhedron.

Proposition 2. The extreme points of $conv(X)$ all lie in a bounded polyhedral set, X .

Proof. The extreme points are not interior points of any line segment in the extreme points of the convex set. In addition, the extreme points of the convex hull are the subset of the feasible experimental design space. Therefore, the extreme points all lie in X .

Further, the proposed optimization model is also formulated with the convex hull of the problem in the context of the MILP framework as follows:

$$MILP = \left\{ \min \hat{\sigma}^2(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \left| \begin{array}{l} LSL \leq \hat{\mu}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \leq USL, \hat{\sigma}^2(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \geq 0, \\ \sum_{j=1}^m z_j^{q_v} \leq 1, h_u(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \leq L_u \text{ and } \mathbf{x}, \mathbf{z} \in X \end{array} \right. \right\} \tag{8}$$

where $X = \{ \mathbf{x}, \mathbf{z} \mid LB_i \leq x_i \leq UB_i, z_j^{q_i} \in \{0,1\}, i=1, 2, \dots, l, j=1, 2, \dots, m, \text{ and } u=1, 2, \dots, k \}$. The MILP can be then replaced by the equivalent LP (linear programming) as follows:

$$LP = \{ \min \hat{\sigma}^2(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \mid \mathbf{x}, \mathbf{z} \in conv(X) \} \tag{9}$$

Note that the ideal solution of $conv(X)$ has the property, which is expressed as $X \subseteq conv(X) \subseteq P$ for all polyhedral (P) formulations. In addition, the ideal solution of $conv(X)$ is solved efficiently by using a branch-and-cut (BC) algorithm.

4. NUMERICAL EXAMPLE

Reconsider the experiment, conducted by Myers et al. (2016), in which the amount of extraction is modelled a function of type of solvent (with solvent A, B, and C). Temperature (x_1) and time (x_2) are also continuous-valued quantitative input variables taken as -1 to +1 on the coded variable scale. The amount of extraction with higher temperatures may give higher yields due to increased solubility. Therefore, it is also desired to obtain higher temperatures for solvent A in this paper. In terms of coded input variables, this leads to constraints on the design variables as follows:

$$1 \leq x_1 + z_1^{q_1} \leq 2$$

where $z_1^{q_1} = \begin{cases} 1 & \text{if solvent A is the level} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$ (10)

$$z_2^{q_1} = \begin{cases} 1 & \text{if solvent B is the level} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

In addition, the desired target value for the amount of extraction is 10 grams, where the allowable lower and upper bounds are 9.5 and 10.5 grams, respectively. Furthermore, the regression model assumed is first-order in temperature, time and the qualitative input variable (solvent) for MILP optimization models. The regression model is also written formally as follows:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varphi_1^{q_1} z_1^{q_1} + \varphi_2^{q_1} z_2^{q_1} \tag{11}$$

In this section, the numerical examples are provided using the proposed model development methodology in this paper for the D - and I -optimality criteria, respectively. Note that the computer, which has 2.3 GHz Intel Core i5 with 8 GB DDR4 memory, is used to run programs with JMP and AMPL software. The desired design point runs are 11 where $p=5$ and $n_a=6$. In addition, Table 2 shows global solutions of design points for the D - and I -optimality criteria.

Table 2. Globally D - and I -optimal designs

Design Criterion Input Variables	D -optimality			I -optimality		
	x_1	x_2	z^{q_1}	x_1	x_2	z^{q_1}
Design Matrix (DM)	0.00	-1.00	A	1.00	1.00	C
	-1.00	1.00	B	-1.00	1.00	B
	-1.00	-1.00	C	-1.00	-1.00	C
	1.00	1.00	A	0.00	-1.00	A
	1.00	-1.00	C	0.00	1.00	A
	1.00	1.00	C	1.00	1.00	B
	1.00	-1.00	A	1.00	-1.00	B
	1.00	-1.00	B	0.01	0.00	A
	1.00	1.00	B	-1.00	-1.00	B
	-1.00	1.00	C	-1.00	1.00	C
	-1.00	-1.00	B	1.00	-1.00	C
Number of iterations	100000			100000		
D -efficiency	94.164			91.569		
Average variance of prediction	0.370			0.353		
Running time (seconds)	62.22			81.48		
Solution type	Global			Global		

In Table 2, the *D*-efficiency is 94% for the *D*-optimality criterion and the *D*-efficiency of the *I*-optimality criterion is about 92%. Hence, the *D*-optimality criterion generates a better solution in order to estimate the model coefficients. In addition, the average variance of prediction for the *I*-optimality is 0.353 compared to 0.370 for the *D*-optimality. This explains confidence intervals for prediction is almost 5% longer for the *D*-optimality. Therefore, the *I*-optimality criterion is preferable for predicting the response in the irregular design space. In addition, the *D*- and *I*-optimal experimental designs and the data are shown in Tables 3 and 4, respectively.

Table 3. *D*-Optimal experimental design and data

Run	Coded levels			Observed data				\bar{y}_u	s_u	s_u^2
	x_1	x_2	z^{q_1}	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}	y_{u4}			
1	0.00	-1.00	A	8.70	11.54	10.07	7.90	9.55	1.600	2.561
2	-1.00	1.00	B	13.97	14.22	6.41	9.61	11.05	3.750	14.063
3	-1.00	-1.00	C	10.13	9.24	10.78	13.80	10.99	1.978	3.913
4	1.00	1.00	A	13.08	8.80	11.38	9.21	10.62	1.996	3.983
5	1.00	-1.00	C	10.21	8.13	9.25	11.50	9.77	1.432	2.0519
6	1.00	1.00	C	12.54	9.30	7.79	8.68	9.58	2.072	4.293
7	1.00	-1.00	A	9.20	8.23	11.09	9.56	9.52	1.188	1.411
8	1.00	-1.00	B	8.96	7.63	7.36	7.87	7.95	0.701	0.491
9	1.00	1.00	B	11.53	7.36	5.97	9.86	8.68	2.488	6.193
10	-1.00	1.00	C	10.22	13.55	11.81	8.97	11.14	1.986	3.944
11	-1.00	-1.00	B	9.09	11.23	10.59	10.08	10.25	0.902	0.813

Table 4. *I*-optimal experimental design and data

Run	Coded levels			Observed data				\bar{y}_u	s_u	s_u^2
	x_1	x_2	z^{q_1}	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}	y_{u4}			
1	1.00	1.00	C	10.68	10.89	11.96	10.92	11.11	0.576	0.332
2	-1.00	1.00	B	8.91	10.00	11.50	8.66	9.77	1.290	1.663
3	-1.00	-1.00	C	7.33	10.62	8.65	8.91	8.88	1.350	1.822
4	0.00	-1.00	A	8.78	10.81	8.18	5.83	8.40	2.051	4.205
5	0.00	1.00	A	5.55	11.17	12.28	9.38	9.60	2.950	8.701
6	1.00	1.00	B	6.82	12.19	12.35	13.59	11.24	3.013	9.079
7	1.00	-1.00	B	7.77	10.11	9.64	15.94	10.87	3.533	12.483
8	0.01	0.00	A	13.35	7.38	10.31	4.96	9.00	3.635	13.210
9	-1.00	-1.00	B	9.96	12.07	9.40	8.17	9.90	1.627	2.649
10	-1.00	1.00	C	8.65	8.90	8.06	10.48	9.02	1.033	1.067
11	1.00	-1.00	C	11.48	9.81	11.60	8.89	10.45	1.319	1.741

Tables 5 and 6 show Analysis of Variance (ANOVA) for the *D*- and *I*-optimal experimental designs.

Table 5. ANOVA for the *D*-optimal experimental design

Source	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	4	8.542078	2.13552	7.0383
Error	6	1.820486	0.30341	P-value
C. Total	10	10.362564		0.0188*

**R²=0.824

Table 6. ANOVA for the *I*-optimal experimental design

Source	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	4	8.7372425	2.18431	18.5122
Error	6	0.7079575	0.11799	P-value
C. Total	10	9.4452000		0.0016*

**R²=0.925

The values of the determination coefficient, R^2 , are 0.824 and 0.925, respectively. Therefore, the models may predict 82.40% and 92.50% of the variability for the D - and I -optimal responses, respectively. The analysis of variance (ANOVA) is shown in Table 5, and the value of an F-test is 7.0383 where the p -value is 0.0188. In addition, the value of an F-test is found 18.5122 for the I -optimal experimental design where the p -value is obtained 0.0016. Therefore, it is concluded that the regression models are highly significant.

No VIF is larger than 10, so there is no severe multicollinearity for the D -optimal design in Table 3. The fitted response functions for the mean, standard deviation, and variance are also obtained using JMP software as follows:

$$\hat{\mu}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = 10.14 - 0.84x_1 + 0.33x_2 + 0.43z_1^{q_1} - 0.66z_2^{q_2} \tag{12}$$

$$\hat{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = 1.93 - 0.27x_1 + 0.59x_2 + 0.04z_1^{q_1} + 0.03z_2^{q_2} \tag{13}$$

$$\hat{\sigma}^2(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = 4.41 - 1.29x_1 + 2.32x_2 - 0.12z_1^{q_1} + 0.98z_2^{q_2} \tag{14}$$

In addition, no VIF is larger than 10, so there is no severe multicollinearity for the I -optimal design in Table 4. The fitted response functions for the mean, standard deviation, and variance are also obtained using JMP software as follows:

$$\hat{\mu}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = 9.76 + 0.76x_1 + 0.22x_2 - 0.77z_1^{q_1} + 0.68z_2^{q_2} \tag{15}$$

$$\hat{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = 2.10 + 0.39x_1 - 0.10x_2 + 0.77z_1^{q_1} + 0.26z_2^{q_2} \tag{16}$$

$$\hat{\sigma}^2(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = 5.46 + 2.06x_1 - 0.21x_2 + 3.22z_1^{q_1} + 1.00z_2^{q_2} \tag{17}$$

The proposed optimization models are also formulated with the convex hull of the D - and I -optimal design problems as follows:

$$MILP_D = \left\{ \begin{array}{l} \min 4.41 - 1.29x_1 + 2.32x_2 - 0.12z_1^{q_1} + 0.98z_2^{q_2} \\ \left. \begin{array}{l} 9.50 \leq 10.14 - 0.84x_1 + 0.33x_2 \\ + 0.43z_1^{q_1} - 0.66z_2^{q_2} \leq 10.50, \\ 4.41 - 1.29x_1 + 2.32x_2 \\ - 0.12z_1^{q_1} + 0.98z_2^{q_2} \geq 0, \\ 1 \leq x_1 + z_1^{q_1} \leq 2, z_1^{q_1} + z_2^{q_2} \leq 1 \\ \text{and } \mathbf{x}, \mathbf{z} \in X \end{array} \right\} \tag{18}$$

$$MILP_I = \left\{ \begin{array}{l} \min 5.46 + 2.06x_1 - 0.21x_2 + 3.22z_1^{q_1} + 1.00z_2^{q_2} \\ \left. \begin{array}{l} 9.50 \leq 9.76 + 0.76x_1 + 0.22x_2 \\ - 0.77z_1^{q_1} + 0.68z_2^{q_2} \leq 10.50, \\ 5.46 + 2.06x_1 - 0.21x_2 \\ + 3.22z_1^{q_1} + 1.00z_2^{q_2} \geq 0, \\ 1 \leq x_1 + z_1^{q_1} \leq 2, z_1^{q_1} + z_2^{q_2} \leq 1 \\ \text{and } \mathbf{x}, \mathbf{z} \in X \end{array} \right\} \tag{19}$$

where $MILP_D$ and $MILP_I$ represent D - and I -optimal designs embedded proposed MILP models, respectively and $X = \{ \mathbf{x}, \mathbf{z} \mid -1 \leq x_i \leq 1, z_j^{q_j} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \text{ and } j = 1, 2 \}$. In addition, the results of the proposed model and traditional counterpart are summarized in Table 7.

Table 7. The results of the proposed model and traditional counterpart for MILP models

Model	Design	Optimal solution				Bias*	$\hat{\sigma}^*(\mathbf{x}, \mathbf{z})$	Solvent
		x_1^*	x_2^*	$z_1^{q_1*}$	$z_2^{q_2*}$			
<i>VM</i>	D -optimality	0.286	-1.000	1.000	0.000	0.000	1.303	A
<i>VM</i>	I -optimality	-	-	-	-	-	-	-
<i>Proposed</i>	D -optimality	0.881	-1.000	1.000	0.000	0.500	0.913	A
<i>Proposed</i>	I -optimality	1.000	-0.091	0.000	0.000	0.500	2.746	C

In Table 7, the proposed models are superior to traditional counterparts when attaining slight bias. For example, the proposed model for the D -optimality achieve approximately 30% more variability reduction than the VM (Vining and Myers, 1990) model. In addition, the VM model does not give an optimal operating condition for the I -optimality due to the strict equality constraint.

Furthermore, some traditional models in the literature may not be appropriate for MILP models. For example, Lin and Tu (1995) model is not appropriate due to $(\hat{\mu}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) - \mu_t)^2$, so this model is not used for the comparison studies in this section.

5. CONCLUSIONS

In this paper, a MILP model is proposed using computer-aided optimal experimental designs in order to obtain an optimum operating condition of both quantitative and qualitative input variables for quality improvement. For the design selection phase, the *D*- and *I*-optimality criteria are preferred over the traditional response designs while considering a non-standard design region. For the estimation purpose, the *D*-optimality criterion is selected. On the other hand, the *I*-optimality criterion is preferred over the *D*-optimality criterion while the prediction performance is priority. For the modeling phase, the first-order polynomial model is used. The mean, the standard deviation and the variance response functions are also calculated for the optimization phase. An application of the convex hull is illustrated in the optimization phase. For the solution procedure, the branch-and-cut method is applied in order to find an optimum operating condition of both qualitative and quantitative input variables. The proposed optimization model achieves more variance reduction than the traditional counterparts. Finally, the proposed methodology is an effective technique to improve the production processes for quality improvement.

For future research studies, multiple quality characteristics could be implement the proposed methodology for multiple response optimization problems. Another research study could be to consider a second-order polynomial model for quadratic effects of quantitative input variables. Then, a general polynomial approximation model could be defined while considering quantitative input variables of a second-order model and qualitative input variables. For the optimization phase, a mixed integer nonlinear programming model could be proposed due to quadratic effects of quantitative input variables.

REFERENCES

- Allen, T. T., & Tseng, S. H. (2011). Variance plus bias optimal response surface designs with qualitative factors applied to stem choice modeling. *Quality and Reliability Engineering International*, 27(8), 1199-1210.
- Arvidsson, M., & Gremyr, I. (2008). Principles of robust design methodology. *Quality and Reliability Engineering International*, 24(1), 23-35.
- Borkowski, J. J. (2003). A comparison of prediction variance criteria for response surface designs. *Journal of Quality Technology*, 35(1), 70-77.
- Box, G. E., & Draper, N. R. (1959). A basis for the selection of a response surface design. *Journal of the American Statistical Association*, 54(287), 622-654.
- Chatterjee, K., Drosou, K., Georgiou, S. D., & Koukouvinos, C. (2018). Response modelling approach to robust parameter design methodology using supersaturated designs. *Journal of Quality Technology*, 50(1), 66-75.
- Cook, R. D., & Nachtrheim, C. J. (1980). A comparison of algorithms for constructing exact *D*-optimal designs. *Technometrics*, 22(3), 315-324.
- Copeland, K. A., & Nelson, P. R. (1996). Dual response optimization via direct function minimization. *Journal of Quality Technology*, 28(3), 331-336.
- Del Castillo, E., & Montgomery, D. C. (1993). A nonlinear programming solution to the dual response problem. *Journal of Quality Technology*, 25(3), 199-204.
- Draper, N. R. (1982). Center points in second—order response surface designs. *Technometrics*, 24(2), 127-133.
- John, R. S., & Draper, N. R. (1975). *D*-optimality for regression designs: a review. *Technometrics*, 17(1), 15-23.
- Kiefer, J., & Wolfowitz, J. (1959). Optimum designs in regression problems. *The Annals of Mathematical Statistics*, 30(2), 271-294.
- Lin, D. K., & Tu, W. (1995). Dual response surface optimization. *Journal of Quality Technology*, 27(1), 34-39.
- Lu, Y., Wang, S., Yan, C., & Huang, Z. (2017). Robust optimal design of renewable energy system in nearly/net zero energy buildings under uncertainties. *Applied Energy*, 187, 62-71.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (Wiley Series in Probability and Statistics).

- Ozdemir, A., & Cho, B. R. (2016). A nonlinear integer programming approach to solving the robust parameter design optimization problem. *Quality and Reliability Engineering International*, 32(8), 2859-2870.
- Ozdemir, A., & Cho, B. R. (2017). Response surface-based robust parameter design optimization with both qualitative and quantitative variables. *Engineering Optimization*, 49(10), 1796-1812.
- Park, G. J., Lee, T. H., Lee, K. H., & Hwang, K. H. (2006). Robust design: an overview. *AIAA journal*, 44(1), 181-191.
- Robinson, T. J., Borrór, C. M., & Myers, R. H. (2004). Robust parameter design: a review. *Quality and Reliability Engineering International*, 20(1), 81-101.
- SAS Institute, 2013. *Using JMP 11*. SAS Institute. Cary, NC USA.
- Smith, K. (1918). On the standard deviations of adjusted and interpolated values of an observed polynomial function and its constants and the guidance they give towards a proper choice of the distribution of observations. *Biometrika*, 12(1/2), 1-85.
- Steinberg, D. M., & Bursztyn, D. (1998). Noise factors, dispersion effects, and robust design. *Statistica Sinica*, 8(1), 67-85.
- Toro Díaz, H. H., Chan, H. L., & Cho, B. R. (2012). Optimally designing experiments under non-standard experimental situations. *International Journal of Experimental Design and Process Optimisation*, 3(2), 133-158.
- Vining, G. G., & Myers, R. H. (1990). Combining Taguchi and response surface philosophies: a dual response approach. *Journal of Quality Technology*, 22(1), 38-45.
- Wald, A. (1943). On the efficient design of statistical investigations. *The Annals of Mathematical Statistics*, 14(2), 134-140.



Döner Kanatlı Hava Araçları İçin Uçuş Verileri Kayıt Cihazı Tasarımının Sonlu Elaman Analizleri ve Deneysel Olarak Doğrulanması

Finite Element Analysis and Experimental Verification of Flight Data Recorder Design for Rotary Wing Aircraft

Barış Kalaycıoğlu¹, Hakan Arslan², İlhan Yapar³

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, KIRIKKALE

² Kırıkkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, KIRIKKALE

³ Milli Savunma Bakanlığı, Askeri Fabrikalar Genel Müdürlüğü, ANKARA

Başvuru/Received: 16/11/2018

Kabul/Accepted: 14/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Özet

Bu çalışmada, helikopterlerde kullanılmak üzere Uçuş Verileri Kayıt Cihazının hafıza modülünün tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiş, uluslararası havacılık standartlarına uyum göstermesi için gerekli testlere tabi tutulmuştur. Tasarım çalışmalarında ANSYS R.16.2 Sonlu Eleman Programı yardımıyla hafıza modülünün dinamik serbest düşme, statik basma ve ısıl geçirgenlik analizleri sayısal olarak yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda ise sayısal olarak bilgisayar ortamında yapılan analizlerin laboratuvar koşullarında testleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik serbest düşme testinde alt kısmında çelik bir pim bulunan, 227 kg ağırlığındaki bir aparat 3 m yükseklikten hafıza modülünün üzerine serbest düşürülmüştür. Parça üzerindeki kalıcı şekil değişimi deneysel çalışmada 2.12 mm ölçülmüş, aynı değer sayısal analizde 1.99 mm olarak hesaplanmıştır. Statik basma testinde hafıza modülü hidrolik bir pres yardımıyla 4500 kg lık bir basma kuvvetine maruz bırakılarak sıkıştırılmaya çalışılmıştır. Basma testi için yapılan hem sayısal analiz hem de deneysel çalışmalar sonucunda hafıza modülünde belirgin bir deformasyonun olmadığı, şekil değişiminin elastik bölgede kaldığı görülmüştür. Isıl geçirgenlik testinde, hafıza modülünün üst cidarına 1100°C sıcaklık 1800 s süresince uygulanmış ve model içerisindeki sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Sayısal çözüm ve deneysel çalışmalar sonucu; hafıza modülü içerisindeki 150°C dereceye dayanıklı kartın 90°C sıcaklığa maruz kaldığı görülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda, tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen Uçuş Verileri Kayıt Cihazına ait hafıza modülünün mekanik ve ısıl analiz sonuçlarının uluslararası havacılık standartları ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Uçuş verileri kayıt cihazı, Dinamik analiz, Statik analiz, Serbest düşme testi, Isıl analiz”

Abstract

In this study, a Flight Data Recorder to be used on helicopters was designed, produced and tested to show compliance to international aviation standards. In design studies, dynamic, static and thermal analyses of flight data recorder were did in the ANSYS R.16.2 Finite Element Program numerically. In the experimental study, the tests of performed analysis in computers were carried out in laboratory. In the dynamic test, an apparatus weighing 227 kg, with a steel pin on the lower surface, was dropped onto the memory module from a height of 3 m. Permanent deformation of the part surface was measured as 2.12 mm in laboratory, similarly the same deformation was calculated as 1.99 mm in computer analysis. In the compression test, the flight data recorder was compressed with a load that is 4500 kg by a hydrostatic press. In both numerical and experimental studies of compression test, the deformation of the flight data recorder is in elastic range of the material since there is no significant deformation in the flight data recorder. In the thermal conductivity test, 1100°C temperature applied to the upper wall of the flight data recorder for 1800 sec. and thermal distribution of interior of the model was investigated. As a result of the numerically analysis and experimental study, it was observed that the card resists until 150°C temperature in the memory module was exposed to 90°C temperature. It was seen that, the results of mechanical and thermal tests which have been performed on designed Flight Data Recorder are compliant with international aviation standards.

Key Words

“Flight data recorder, Dynamic test, Static test, Drop test, Thermal test”

1. Giriş

Uçuştaki kazaların incelenmesi amacıyla, havacılık uygulamalarında Uçuş Verileri Kaydedicisi ve Kokpit Ses Kayıt Cihazı gibi elektronik bileşenler kullanılmaktadır. Uçuş Verileri Kayıt Cihazı; uçuşlarda yaşanabilecek hava aracı olaylarının ve kaza kırılmalarının daha sağlıklı değerlendirilebilmesi ve önleyici tedbirler alınabilmesi amacıyla uçak ve helikopter gibi hava araçlarında kullanılmaktadır. Diğer cihazlar uçağın burun kısmına yakın bölgede bulunmasına rağmen bu cihazlar yapılan analizler ve kaza tecrübeleri sonucu uçakların en az hasar aldığı arka kısmında bulunurlar.

Kaza önlemeye yönelik çok önemli bilgiler sağlayabilen uçak ve yer bazlı pek çok havacılık kayıt cihazları bulunmaktadır. Ana bilgi kaynakları; zorunlu kara kutular, uçak hızlı geçiş veri kayıt cihazları ve hava trafik kontrolün (ATC), radar dönüşümlerinin ve telsiz iletişimlerinin yer bazlı kayıtlarını içermektedir.

Kaza sonrası sağlam kalabilen kayıt cihazı ile ilgili ilk gereksinim 1940 'larda meydana gelen uçak kazaları sonucu ortaya çıkmıştır. Bu durum Sivil Havacılık Kurumunu kaza inceleme amaçlı bir uçuş kayıt cihazının gerekliliği için düzenleme yapmaya zorlamıştır. Ancak II. Dünya savaşı ve uygun cihaz bulunamaması nedeni ile 1957 yılına kadar herhangi bir gelişme olmamıştır. 1957 yılında Sivil Havacılık Otoritesi uçuş kayıt cihazı düzenlemesini yayınlamaya, 5670 kg'dan ağır olan ve yaklaşık 7600 m üstünde uçan tüm uçakların, 1 Temmuz 1958 tarihinden itibaren yükseklik, hava hızı, uçağın baş istikameti ve tırmanma ivmesini kaydeden bir kara kutu ile donatılmasının gerekliliğini karara bağlamıştır (ED-112 (2013); Marlon ve arkadaşları, (2006)).

Marlon ve arkadaşları, (2006) Sivil Havacılık Kurumu (CAB) uçuş ekibinin konuşmalarını kaza inceleme amacıyla kaydedilmesini istemesi üzerine Federal Havacılık Dairesi Kokpit Ses Kaydedicisi (CVR) için fizibilite çalışmalarını tamamlayarak zorunlu olarak CVR kullanımını 1966 ve 1967 yıllarında yürürlüğe almıştır. Böylece Uçuş Verileri Kaydedicisi ve Kokpit Ses Kaydedicisi olarak iki sistem devreye alınmıştır. Uçuş Veri Kayıt cihazlarının sivil uçaklarda kullanılmasına yönelik yasa ilk olarak Amerikan Sivil Havacılık Kurulu tarafından 1945-1954 yılında yayınlamıştır. Akabinde 1958 yılında ilk kez bir Uçuş Veri Kayıt Cihazı test edilerek kabul edilmiştir.

Karteek ve arkadaşları, (2006) tarafından takviyeli ve takviyesiz izotropik ve kompozit malzemeler kullanılarak şok titreşim yüklerine maruz bırakılan Uçuş Verileri Kayıt Cihazının modellenmesi ve analizi ANSYS R.12 programı kullanılarak yapılmıştır. Analizler sonucunda, mukavemeti muhafaza ederek ağırlığı azaltmak için cihazın birkaç bölümü için karbon epoksi kompozit kullanımı önerilmiştir. Joseph ve arkadaşları, (1994) tarafından füze uçuş testleri için bir uçuş kayıt cihazı geliştirilip, uçuş sırasında serbest düşme testleri yapılmış ve 40,000 G'yi aşan şok darbe yükleri için başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Rana ve arkadaşları, (2015) çalışmalarında uçuş veri kayıt cihazlarının yüksek sıcaklık alevinden termal koruması için materyal seçimi ve boyutların belirlenmesi amacı ile termal tasarımını yapmışlardır. Bu amaçla, metal gövde, ısı yalıtımı ve faz değiştirme malzemesi içeren üç eş merkezli tabaka konfigürasyonu yoluyla geçici ısı iletimini sayısal olarak incelemiştir.

Literatürde yer alan ve uçuş kayıt cihazları ile ilgili olmayan çalışmalardan bir kısmında, ambalajlı ve ambalajsız ürünlerin (televizyon, buzdolabı, v.b.) düşme testlerini simüle etmek için sonlu elemanlar analizi (FEA) uygulanmış (Kisielewiz ve arkadaşları, (1993) – Wang ve arkadaşları, (2005)), bir kısmında ise çeşitli malzeme ve ürünlere deneysel serbest düşme testleri uygulanmış ve sonuçları incelenmiştir (Schwer ve arkadaşları, (2000) – Anderson ve arkadaşları, (2000)). Diğer çalışmalarda ise çeşitli malzeme ve ürünlere hem düşme testleri uygulanmış hem de sonlu elemanlar analizi kullanılarak düşme testi simülasyonları yapılmış ve bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır (Yeh, (2014) – Yıldırım, (2014)). Bu çalışmalardan bazıları şunlardır;

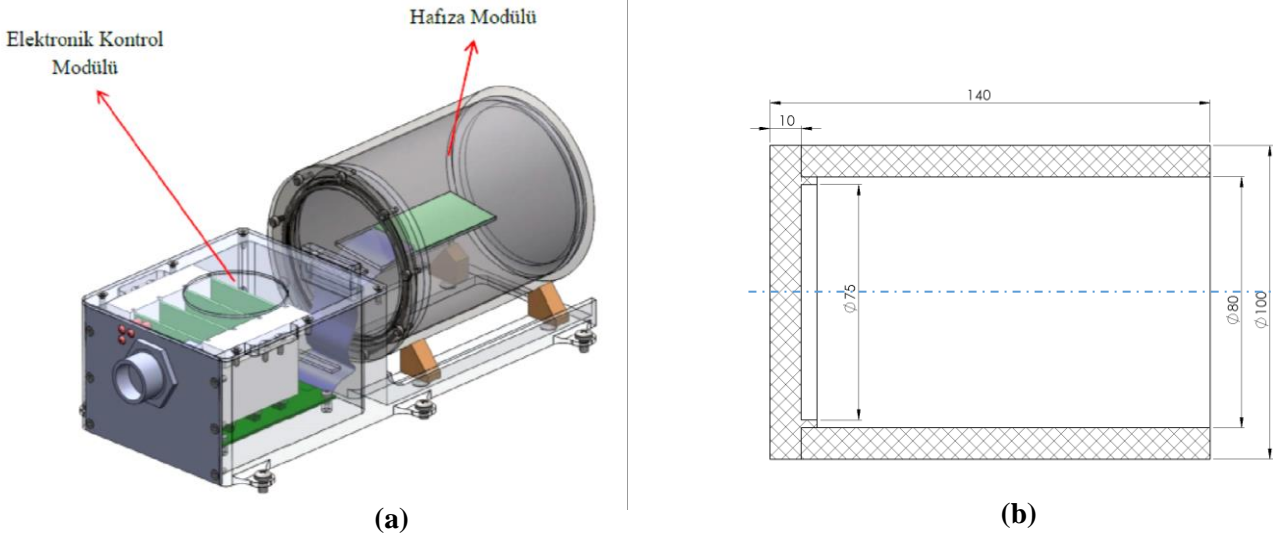
Yeh ve Huang, (2014) çalışmasında, FR-4 test panosu için ANSYS LS-DYNA sonlu eleman yazılımını kullanarak maksimum Gerilme-Gerinim değerlerini ve deneysel düşme testi uygulayarak da maksimum gerinim sonuçlarını elde etmiştir. Deneysel sonuçlarla sonlu eleman analiz sonuçlarını (LS-DYNA gerinim sonuçları) ile karşılaştırdığında uyumlu olduğunu tespit etmiştir. Eren, (2015) yüksek lisans tezinde, iç içe geçmiş farklı uzunluk ve geometrideki ezilme kutularının (tüplerin) deneysel ve sayısal olarak (LS-DYNA/Explicit ve Implicit kullanarak) çarpma sonrası ezilme davranışlarını incelemiştir. Ayyıldız, (2006) yılında yüksek lisans tez çalışmasında, bir buzdolabı için sonlu elemanlar analizi kullanılarak düşme testi simülasyonunu ve deneysel düşme testini gerçekleştirmiş ve deney sonuçlarıyla simülasyondan elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğunu gözlemiştir. Yıldırım, (2014) tez çalışmasında, kızak tipi iniş takımına sahip insansız bir hava aracının yere inişi sırasında iniş takımlarının maruz kaldığı yükler, bu yükler neticesinde yapıda oluşan gerilmeler ve deformasyonları deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir. Bu incelemeler sonucunda bulunan gerinim, gerilme değerleri karşılaştırıldığında ölçülen en büyük gerilme değeri için % 7.1 hata oranı ile sonlu elemanlar analizleri doğrulanmıştır.

Bu çalışmada; helikopterlerdeki uçuş verilerini ve kokpit seslerini kayıt edecek ED-112 havacılık standardında yer alan gereksinimleri karşılamak için tasarlanan bir Uçuş Verileri Kayıt Cihazının sonlu eleman analizleri ve deneysel testlerle doğrulanması amaçlanmıştır. Modelin sayısal analizleri ANSYS R.16.2 programının dinamik, statik ve ısıl modülleri kullanılarak

ayrı ayrı yapılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında, prototip imali yapılan cihazın dinamik, statik ve ısı testleri için test düzenekleri hazırlanmış ve testler gerçekleştirilmiştir. Prototip tasarım üzerinde yapılan mekanik ve ısı test sonuçlarının sayısal sonuçlar ve uluslararası havacılık standartları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

2. Uçuş Verileri Kayıt Cihazı Tasarımı

Uçuş Verileri Kayıt Cihazı Şekil 1.a. 'da görüldüğü gibi iki ana bölümden oluşmaktadır. Birincisi sesi ve veriyi toplayarak kaydedilmeye uygun formata dönüştüren elektronik kontrol birimi, ikincisi kazaya dayanıklı hafıza birimidir. Elektronik Kontrol Modülü: Girişler, üzerinde 4 Adet A-429 Veri Kanalı ve 1 Adet Ses Kanalı bulunan konektörle, çıkışlar, üzerinde ses ve uçuş verisi aktarımı için 2 adet çıkış bulunan konektör ile sağlanmaktadır. Hafıza Modülü; Elektronik Kontrol Modülü Yazılımı, Verilerin toplanması, hafıza modülüne kaydedilmesi ve kaydedilen verilerin bilgisayara aktarılması için gömülü olarak geliştirilmiştir. Modülde 512 MB Ses ve 512 MB Uçuş Verisi kaydedilmektedir.



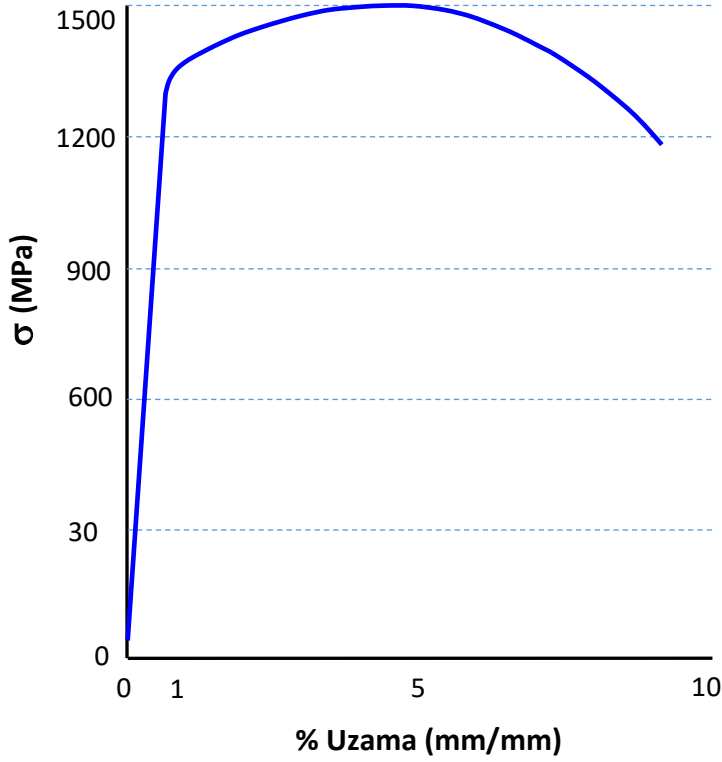
Şekil 1 a. Uçuş verileri kayıt cihazının genel modeli, b. Kesit görünüşü ve boyutları

2.1. Hafıza Modülünün Boyutları ve Malzeme Özellikleri

Uçuş Verileri Kayıt Cihazının Veri Toplama Elektronik Kontrol Modülü, Alüminyum 2024 T6 malzemeden üretilmiştir. Hafıza modülü ısı işlem görmüş 34CrNiMo4 / (4340) çelik malzemeden üretilmiş olup, kaza kırılmalarında hafıza biriminin kurtarılması gerekmektedir. Şekil 1.b.'de Hafıza modülünün boyutları verilmiştir. Hafıza modülünün üretiminde kullanılan ısı işlem görmüş 34CrNiMo4 / (4340) çeliğine ait mekanik özellikler Tablo 1 'de ve çekme deneyi grafiği Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 1. 34CrNiMo4 / (4340) çelik malzemesinin mekanik özellikleri

Çekme Numunesi;		Kesit alanı: 78.5 mm ²		Çekme uzunluğu: 50 mm	
Elastisite Modülü	Akma Muk. Müh / Gerçek	Çekme Muk. Müh / Gerçek	Uzama	Isıl İşlem Sıcaklığı	
210 Gpa	1320 MPa /1333 Mpa	1452 MPa / 1533 MPa	% 9.63	420°C	

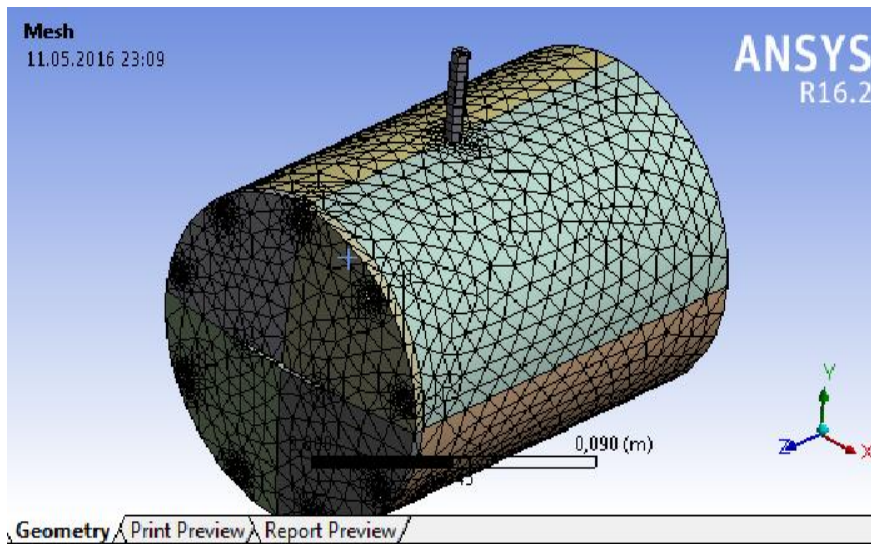


Şekil 2. Isıl işlem görmüş 34CrNiMo4 / (4340) çelik malzemesinin çekme deneyi eğrisi

2.2. Sayısal Çalışmalar

2.2.1. Serbest Düşme Testi için Sayısal Çözüm

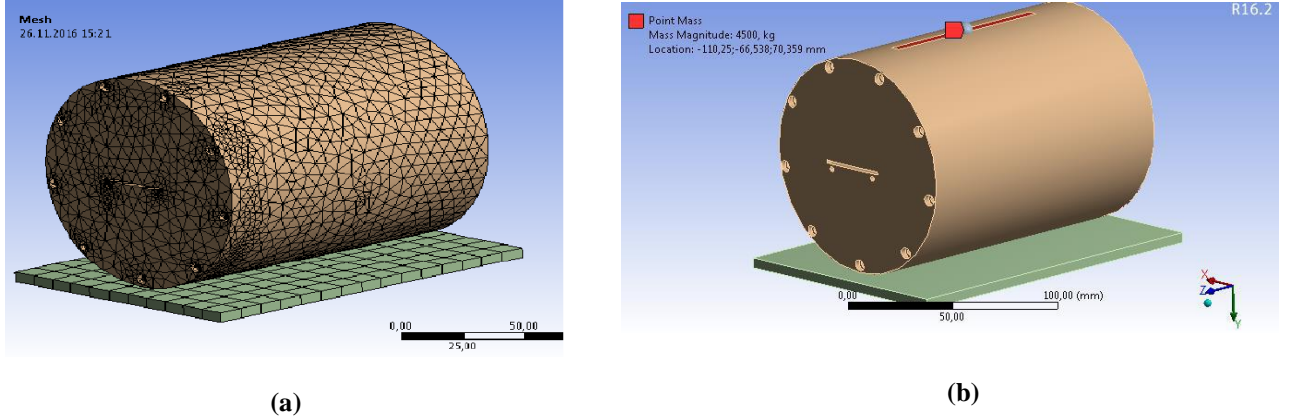
Modelin analizine başlamadan önce ED-112 standardı gereksinimleri dikkate alınarak Solidworks programında hafıza modülü silindirik olarak tasarlanmış ve model ANSYS R.16.2 Sonlu Eleman Programına aktarılmıştır. Programda malzeme modeli bilinear isotropic hardening olarak seçilmiş, başlangıç ve sınır şartları girilerek zamana bağlı analize tabii tutulmuştur. Analizde alt kısmına pim monte edilmiş, 227 kg ağırlığındaki aparat 3 m yükseklikten düşürülmeyip, aynı etkiyi yapacak şekilde 227 kg lık bir pim silindirik hafıza modülüne Şekil 3 'te gösterildiği gibi bitişik olarak modellenmiştir. Serbest düşme formülünden pim hızı 7.652 m/s olarak hesaplanmış ve programda sınır koşul olarak tanımlanmıştır. Sonlu eleman modelinde silindirde pimle birlikte toplam 10767 düğüm noktası ve 40355 eleman sayısı elde edilmiş ve ekran görüntüsü Şekil 3 'te verilmiştir.



Şekil 3. Modelin Ağ Örgüsü

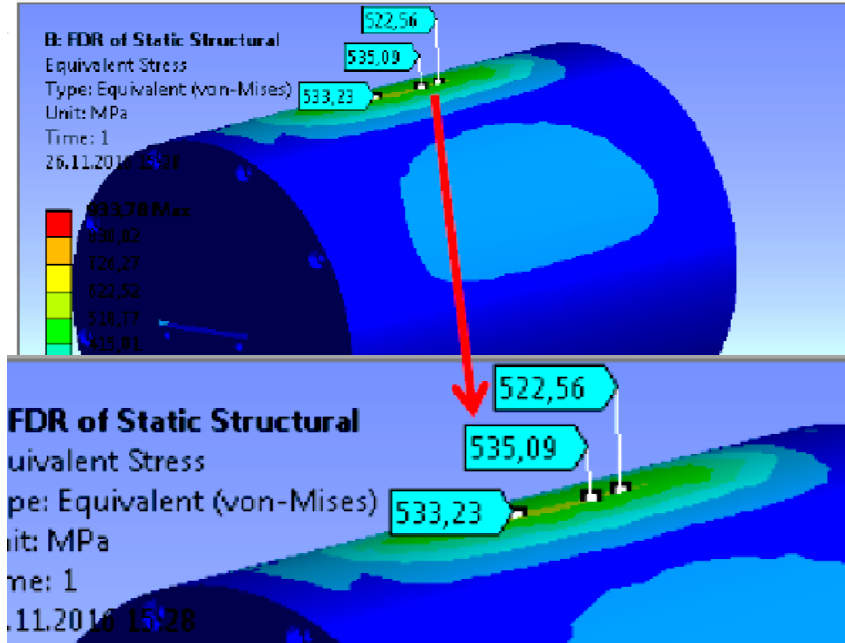
2.2.2. Statik Basma Testi için Sayısal Çözüm

Statik basma testi ANSYS Sonlu Eleman Programı kullanılarak sayısal olarak gerçekleştirilmiş ve oluşan deformasyonlar gözlemlenmiştir. Standartlara uygun olarak Şekil 4 'te görüldüğü üzere rijit bir tablanın üzerine yerleştirilen silindirik modele üst kısmından bir başka rijit düzlemsel eleman yardımıyla 4.5 ton luk statik bir basma yükü uygulanmıştır. Sonlu eleman modelinde silindir ve tabla ile birlikte toplam 279223 düğüm noktası ve 194834 eleman sayısı elde edilmiş ve ekran görüntüsü Şekil 4 'te verilmiştir.

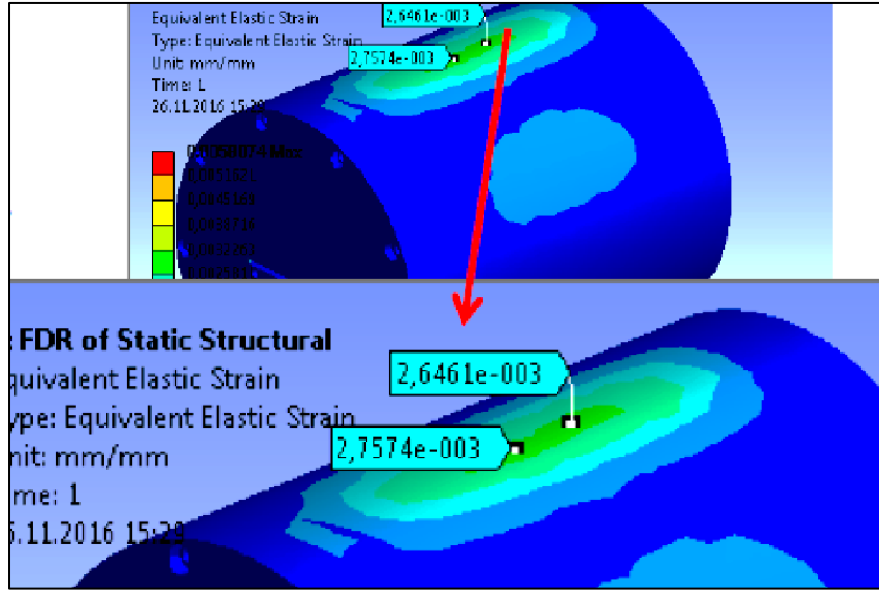


Şekil 4. Silindirik Malzemenin (a) Ağ Örgüsü (b) Modele Yükün Uygulanması

Sayısal çözüm tamamlandığında, Şekil 5 'te görüldüğü gibi parçada maksimum Von Mises efektif gerçek gerilme değerinin 535 MPa olduğu görülmüştür. Ayrıca silindirin üst yüzeyindeki maksimum efektif şekil değiştirme değerinin 0.002757 mm olduğu (Şekil 6) ve bu değer malzemenin elastik bölgesi içerisinde kalmasından dolayı parçada kalıcı şekil değişiminin olmayacağı anlaşılmıştır.



Şekil 5. Analiz Sonucu Elde Edilen Gerilme Değerleri



Şekil 6. Analiz Sonucu Elde Edilen Şekil Değişirme Değerleri

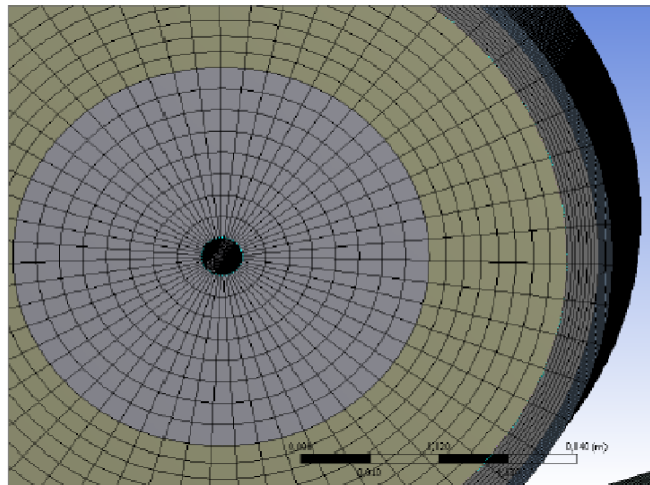
2.3. Yüksek Sıcaklık Testi için Sayısal Çözüm

Yüksek sıcaklık testi ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı verilerek termal iletkenlik çözümlenmesi ile gerçekleştirilmiş ve hafıza modülüne ait silindirik modelin katmanları boyunca sıcaklık değişimi incelenmiştir. Modelde silindir için çelik malzeme, üst katman olarak termal boya malzemesi ve iç eleman olarak cam elyaf malzeme seçilmiş ve sonlu eleman ısıl analizi için Tablo 2 'de verilmiş olan boyanın, yapı çeliği ve cam elyaf için termal malzeme özellikleri girilmiştir. Verilen özellikler ANSYS programının malzeme kütüphanesinden alınmıştır.

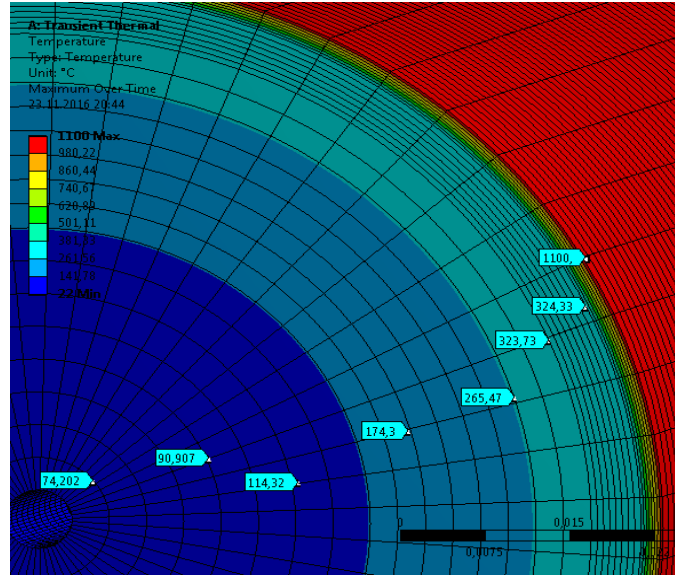
Tablo 2. Termal boya, yapı çeliği ve cam elyaf için termal malzeme özellikleri

	Yoğunluk kg/m ³	Isı İletim Katsayısı W/mK	Özgül Isı J/kgK
Termal Boya Malzemesi	1260	0.01	5000
34CrNiMo4 / (4340) Çelik Malzemesi	7850	60.1	434
Cam Elyaf Malzemesi	35	0.046	5000

Isıl analizde silindir üzerindeki boya yüzeyine uygulanacak sıcaklık değeri 1100^oC olarak girilmiş ve son işlem zamanı 1800 saniye girilerek zamana bağlı ısıl analiz gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modelinde toplam 459858 düğüm noktası ve 110454 eleman sayısı elde edilmiş ve ekran görüntüsü Şekil 7 'de verilmiştir.



Şekil 7. Termal Analiz için Modelin Ağ Örgüsü



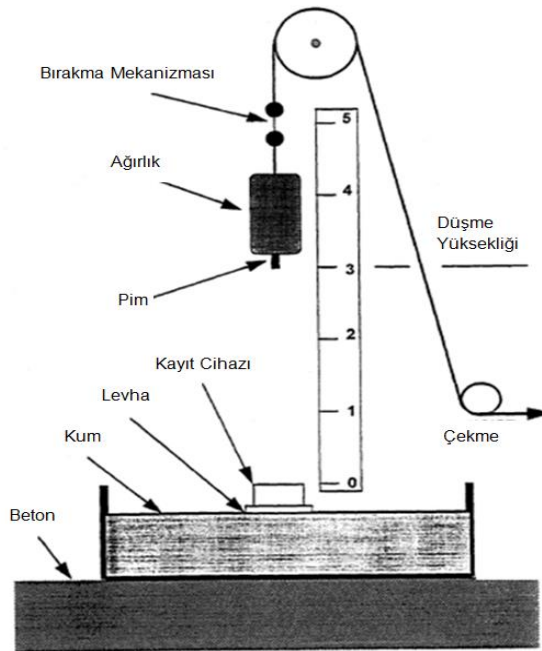
Şekil 8. Analiz Sonucu Bulunan Silindirdeki Sıcaklık Dağılımı

Yapılan zamana bağlı ısıl analiz sonucunda Şekil 8 'de gösterildiği gibi çok katmanlı silindirik modelin boyalı dış yüzeğinin sıcaklığı 1100°C, boyanın alt yüzeği ve çelik malzemenin üst yüzeğinin sıcaklığı 324.33°C ve çelik malzemenin alt yüzeği ise yine çelik malzemenin üst yüzeğine yakın bir sıcaklık değerinde 323.73°C bulunmuştur. Katmanlı silindirik modelin cam elyaf kısmında sıcaklık değişiminin, üst yüzeğde 323.73°C den merkeze en yakın iç yüzeğine 74°C ye kadar düştüğü gözlemlenmiştir.

3. Deneysel Çalışmalar

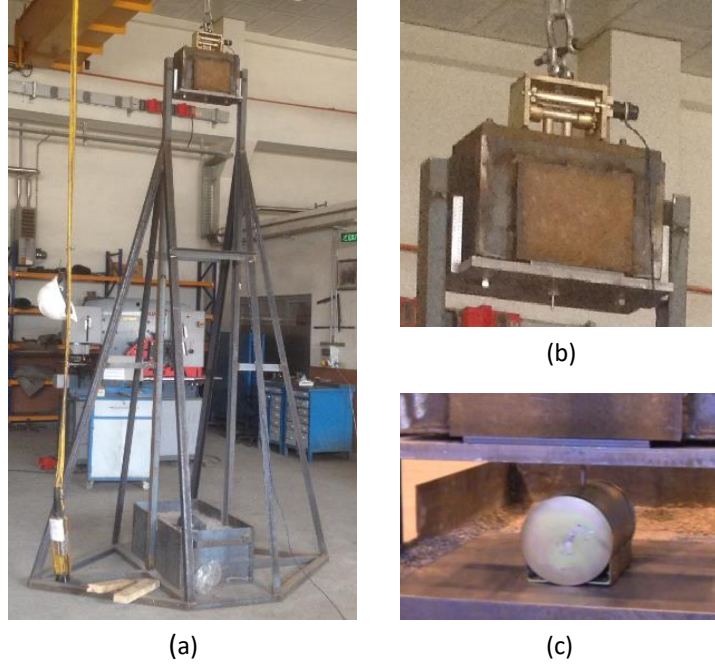
3.1. Serbest Düşme Testi

Uçuş Verileri Kayıt Cihazı tasarımı aşamasında yapılması gerekli Serbest Düşme Testi için standarda uygun test düzeneği Şekil 9 'da verilmiştir.



Şekil 9. Serbest Düşme Test Düzeneği ED-112

Şekil 10 'da gösterilen serbest düşme test düzeneği yardımıyla alt kısmında çelik pim bulunan, 227 kg ağırlığındaki bir aparat 3 m yükseklikten ilk önce düşey konumda ki hafıza modülünün dairesel bombeli yan yüzeğine daha sonra yatay konumda silindirik yüzeğine serbest düşürülmüştür.



Şekil 10. (a) Serbest Düşme Test Düzeneği, (b) Delme Pimi, (c) Test Edilecek Numune

Hafıza modülü düşey konumda iken yapılan test sonucunda dairesel bombeli yan yüzeyde yaklaşık 1.5 mm kadar çökme olduğu ölçülmüştür. Yapılan testte pimin hafıza birimini muhafaza eden yapıya nüfuz edemediği, hatta pimin kendisinin kırıldığı görülmüştür. Serbest düşme testi hafıza modülünün yatay pozisyondaki konumu için tekrar edilmiştir. Numunenin yatay konumdaki pozisyonu için yapılan test sonucunda numunenin silindirik yüzeyinde oluşan deformasyon 2.12 mm ölçülmüş ve yine Şekil 11 'de görüldüğü üzere delici pimin numune içine nüfuz etmediği gözlenmiştir. ED-112 standardı serbest düşme testi uygulanacak malzemenin en zayıf yüzeyine ağırlığın düşürülmesi gerektiğini öngörmektedir. Bununla beraber ED-112 test standardı serbest düşme testi sonrası ağırlık ucundaki pimin hafıza birimini muhafaza eden yapıya nüfuz etmiş olsa dahi, hafıza birimine zarar vermemesi gerektiğini söylemektedir. Deneysel çalışma sonrasında düşürme testi sonrasında elde edilen sonuç hafız modülünün ED-112 test standardını karşıladığını göstermiştir.



Şekil 11. Düşey ve yatay konumda yapılan test sonucunda deforme olmuş numune

3.2. Statik Basınç Testi

Silindir gövdeli hafıza modülüne ED-112 standardına göre en az 22.25 kN değerinde statik basma kuvvetinin uygulanması gerekmektedir. Statik basma deneyi sonucunda ilgili standarda göre hafıza modülünün herhangi bir plastik deformasyona uğramaması istenmektedir. Yapılan çalışmada hidrolik pres yardımı ile gerçekleştirilen statik basınç testinde ise numuneye bu değerin 2 katı büyüklüğünde (45 kN değerinde) bir kuvvet uygulanmış ve bu test dört defa tekrarlanmıştır. Dört tekrarın ikisi hafıza modülü yatay konumda iken, diğer ikisi ise hafıza modülü dikey konumda iken gerçekleştirilmiştir. Test düzeneği (yatay konum) Şekil 12 'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Statik Basınç Testi Düzenegi (Yatay Konum)

Dikey konumda ki hafıza modülüne beş dakika süre ile iki ayrı statik basma test yapılmıştır. Test düzenegi (Dikey Konum) Şekil 13 'te gösterilmiştir.

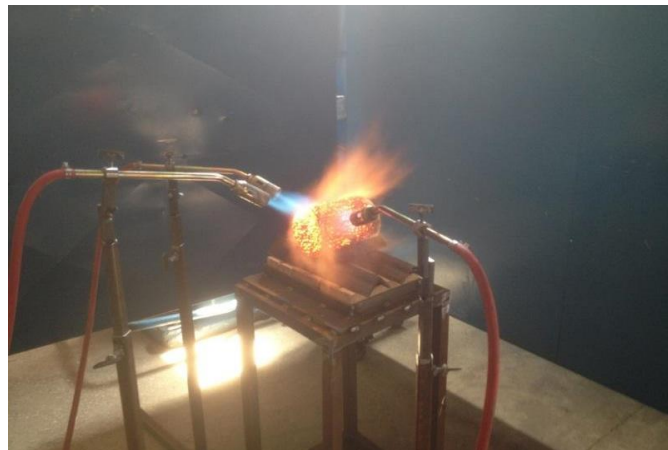


Şekil 13. Statik Basınç Testi Düzenegi (Dikey Konum)

Dört defa tekrarlanan statik basınç testleri sonucunda silindirik malzeme üzerinde herhangi bir deformasyon olmadığı gözlenmiştir.

3.2. Yüksek Sıcaklık Testi

Yüksek sıcaklık testi için uçuş kayıt cihazına ait hafıza modülünün dış yüzeyi 950°C - 1100°C sıcaklıkta 30 dakika sürekli olarak ısıtılmıştır. Oluşturulan test standı ve ısıtma anı Şekil 14 'te gösterilmiştir. Dış sıcaklık değerleri kalibreli termometre ve termal kamera ile kontrol edilmiş, iç sıcaklık ise termal kartlarla kayıt altına alınmıştır. Hafıza modülü ısı yalıtımı amacıyla özel bir termal boya ile kaplanmıştır. Termal boya, yanma esnasında şişerek ısıyı malzeme içine nüfuz etmesini engellemektedir. Şekil 15 'te malzeme üzerinde şişen boya görülmektedir.



Şekil 14. Numuneyi 1100°C de 30 Dakika Isıtma işlemi



Şekil 15. Hafıza Modülünün Isı Sırasında Şişen Boya İle Kaplanması

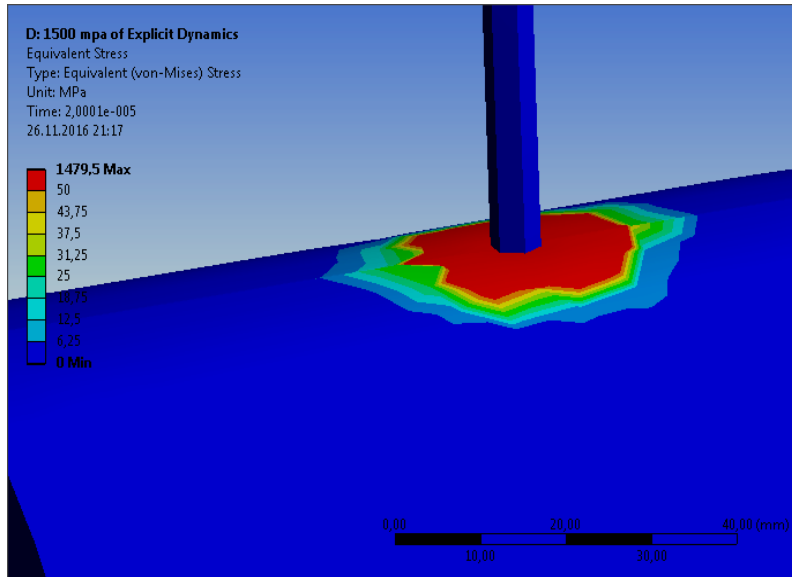
Test sırasında hafıza birimini sembolize eden termal kart kullanılmıştır. Bu malzeme üzerinde ısı bandı sensörleri olduğundan test boyunca sıcaklık artışı ölçümü yapılabilmektedir.

4. Bulgular ve Tartışmalar

4.1. Serbest Düşme Testi

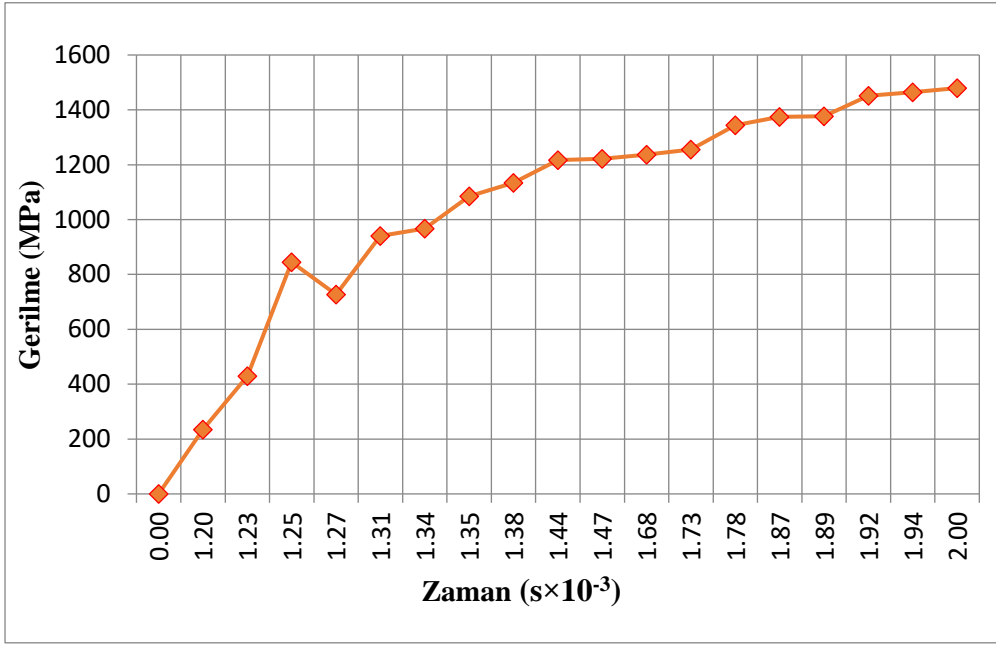
ED-112 standardı serbest düşme testi uygulanacak malzemenin en zayıf yüzeyine ağırlığın düşürülmesi gerektiğini öngördüğünden dolayı deneysel sonuçlar irdelenmiş ve hafıza modülünün en zayıf bölgesi dikkate alınarak düşürme testinin sayısal analizi sadece silindirik bölge için gerçekleştirilmiştir.

Malzemenin serbest düşme testine yönelik yapılan sayısal analizinde Şekil 16 'da görüldüğü gibi maksimum eşdeğer gerçek gerilme değeri 1479 MPa olup, bu değerin malzemenin gerçek akma dayanım değeri olan 1333 MPa 'ın üzerinde ancak gerçek çekme dayanım değeri olan 1524 MPa 'ın altında kaldığı görülmüştür. Bu sonuç malzemede serbest düşme testine yönelik yapılan sayısal analiz sonucunda çelik hafıza modülünün plastik deformasyona uğradığı ancak herhangi bir delinmenin ve yırtılmanın oluşmayacağı anlamına gelmektedir.



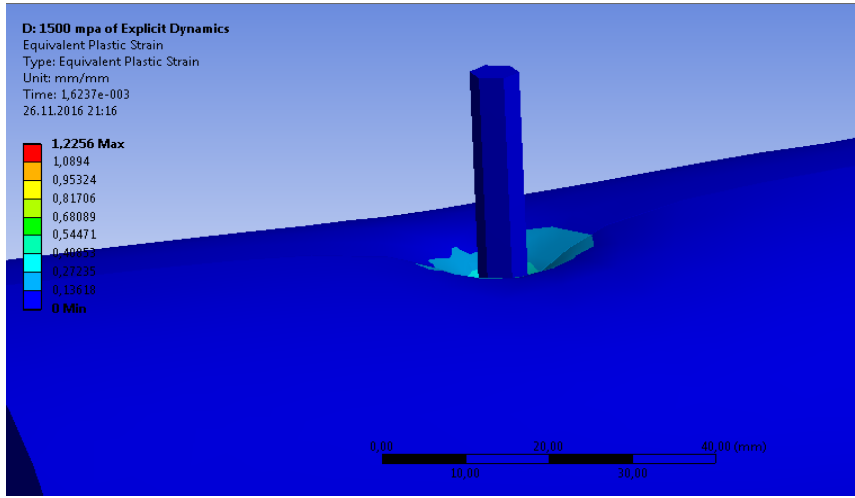
Şekil 16. ANSYS'te Eşdeğer Gerilmenin Bulunması

Analizde pimin silindire çarpma süresi 2 milisaniye olarak alınmış ve bu sürede silindir malzeme için elde edilen eşdeğer Gerilme grafiği Şekil 17 'de gösterilmiştir.



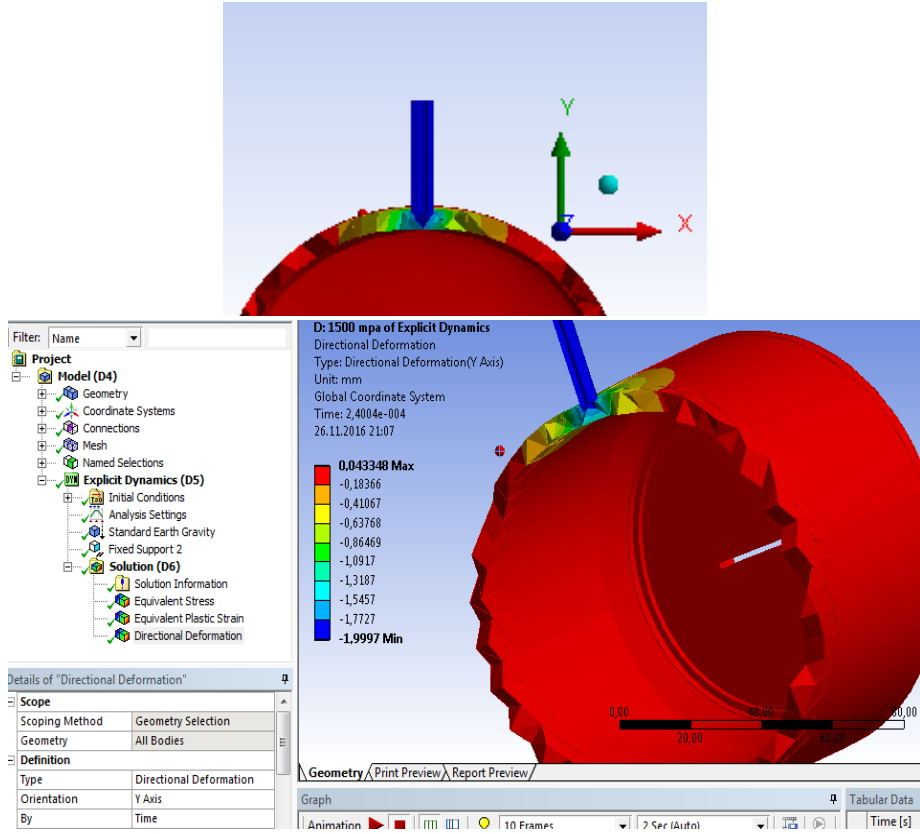
Şekil 17. Eşdeğer Gerilme Grafiği

Parça üzerinde kalıcı deformasyon olup olmadığına bakıldığında; modelde 1.225 mm/mm mertebesinde plastik birim Şekil değiştirme görülmektedir. Şekil 18 'de elde edilen analiz sonuçları incelendiğinde, silindir yüzeyinde plastik deformasyonun olduğu ancak pimin silindiri delmediğini görülmektedir.



Şekil 18. Eşdeğer Plastik Birim Şekil Değiştirme

Şekil 19 'da görüldüğü üzere serbest düşme analizi sonucunda silindir üzerinden pim eksenine (y eksenine) boyunca oluşan deformasyon (kme) yaklaşık 2 mm olarak bulunmuştur.

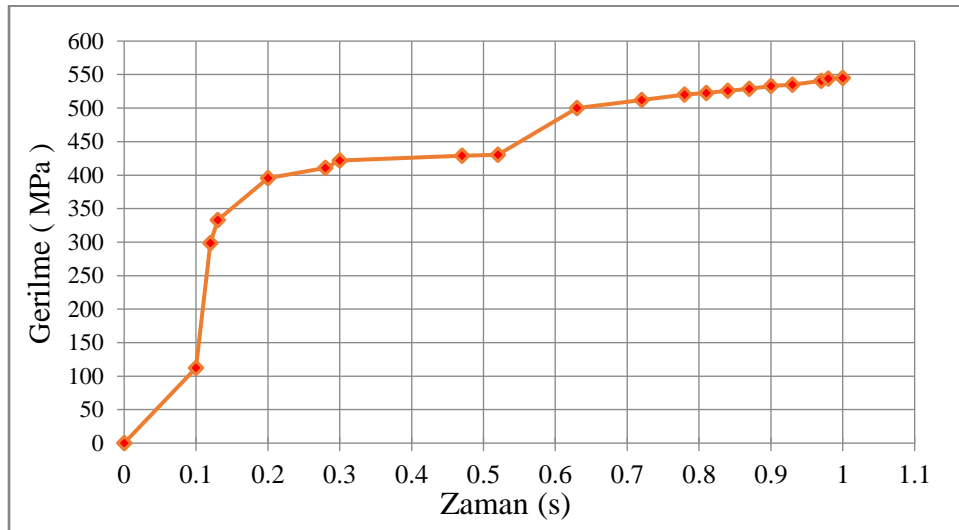


Şekil 19. y Eksenindeki Çökme

Deneyel çalışmalar sonucu 3 m yüksekliğinden (imal edilen kuleden) bırakılan altı çelik pimli ağırlık, model üzerine düşürülmüş ve y ekseninde 2.12 mm lik kalıcı şekil değişikliği meydana gelmiş ancak malzeme delinmemiştir. Yapılan sayısal ve deneysel çalışmalar karşılaştırıldığında, bulunan deformasyon değerleri açısından % 90 civarında bir doğruluk sağlanmıştır.

4.2. Statik Basınç Testi

Statik basma testi sayısal analizde, model üzerine 4.5 ton yük uygulanmış ve oluşan deformasyon izlenmiştir. Analiz sonucu elde edilen Statik Basma Gerilme-Zaman grafiği Şekil 20 'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde 4.5 tonluk yük altında maksimum gerçek gerilme değeri 540 MPa civarı çıktığı görülmektedir. Malzemenin gerçek akma dayanım değeri olan 1333 MPa olduğu değerlendirildiğinde, statik yük altındaki deformasyon elastik bölgede kalmış olup, malzemede kalıcı şekil değişikliği meydana gelmemiştir. Sayısal olarak yapılan basma testi analizi sonucunda elde edilen elastik şekil değiştirme statik basma deneyi ile elde edilen sonuçlarla uyum göstermiştir.



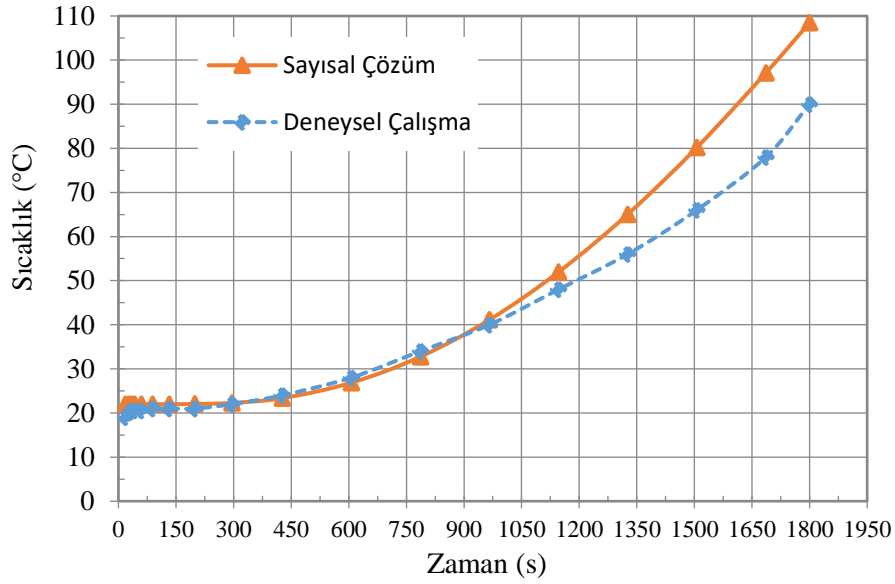
Şekil 20. Sayısal Analiz sonucu elde edilen Statik Basma Gerilme-Zaman Grafiği

Deneyel testlerde 4.5 ton yüke ayarlanmış hidrolik preste model üzerine hem yatay hem de düşey konumda yük uygulanmış ve herhangi bir deformasyon gözlenmemiştir.

4.3. Sıcaklık Testi

Yüksek sıcaklık testinde, model 950°C - 1100°C sıcaklıkta 30 dakika sürekli olarak ısıtılmış ve deney sonucu elde edilen sıcaklık değişim grafiği Şekil 21'de gösterilmiştir. Deneyel testlerde hazırlanan düzenek ile üç adet pürmüz kullanılarak, model dış sıcaklığı 1100°C derecede tutulmuş ve 800°C - 1300°C skalalı termometre ve termal kamera ile bu sıcaklığın 30 dakika korunması kontrol altına alınarak sağlanmıştır. Test sonucu model içine konulan termal kartlardan iç sıcaklığın maksimum 90°C olduğu görülmüştür.

ANSYS programı kısa süreli Isıl Analiz modülü ile yapılan sayısal çözüm sonucunda, 1800 saniye sonunda hafıza modülü kartının olduğu bölümde Şekil 21 'de görüldüğü üzere sıcaklık 110°C derece olarak elde edilmiştir. İlk 400 saniye boyunca sıcaklık üst katman boya ve cam elyaf tarafından 20°C ile 30°C arasında korunurken daha sonra hafıza modülü bölümünde sıcaklık artışı gözlemlenmektedir.



Şekil 21. Yüksek Sıcaklık Testi Sıcaklık-Zaman Grafiği

Katmanlara göre sıcaklık dağılımını incelemek üzere Şekil 22 'de gösterilen grafik çizdirilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi; üst katman olan termal boya, 1100°C sıcaklıktan 324°C sıcaklığa kadar yalıtım sağlamakta, çelik malzemedeki silindir, neredeyse tamamen ısıyı iletmekte ve cam elyaf malzeme de 323°C olan sıcaklığın 70°C sıcaklığa kadar düşürmektedir. 150°C 'ye kadar dayanımı olan iç taraftaki kart ve entegrelerin analiz sonucu alınan 74°C ile 114°C sıcaklıklardan etkilenmeyeceği görülmüştür.

Referanslar

- Anderson T. & Madenci, E. (2000). Experimental investigation of low-velocity impact characteristics of sandwich composites. *Composites Structure*, 50(3), 239–247.
- Ayyıldız, A. (2006). Buzdolabı Düşürme Testinin Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Nonlinear Analizi ve Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Eren, Z. (2015). Eksenel Darbe Yüğü Uygulanan İç İç Tüplerin Çarpışma ve Ezilme Davranışının Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- EUROCAE(ED-112) Standards. (2003). Minimum operational performance specification for crash protected airborne recorder systems.
- Fasanella, E. L. & Jackson, K. E. (2002). Best Practices for crash modeling and simulation. *Technical Report NASA/TM-2002-211944*, Langley Research Center, Hampton.
- Grossi, R. D. (2006). Aviation Recorder Overview. *Journal of Accident Investigation*, 2(1), 31-42.
- Hill-Lindsay, J. W. & Yuen, J. T. (1994). Ultra-High Impact Resistant Digital Data Recorder for Missile Flight Testing, *IEEE Transactions On Components, Packaging and Manufacturing Technology-Part A*, 17(3), 398 – 403. doi:10.1109/95.311749
- Hsu, H. & Hsian, B. (2004). Applications of LS-DYNA in electronic products. *7th International LS-DYNA Users Conference*, South Michigan, USA.
- Jackson, K. E. & Fasanella, E. L. (2004). Development of an LS-DYNA model of an atr42-300 aircraft for crash simulation. *8th International LS-DYNA Users Conference*, Dearborn, Michigan, May 2-4.
- Kim, H., Lee, J. & Park, S. (1997). Application of drop-impact simulation for package cushioning material reduction. *PUCA'97*, 1997, 299–303.
- Kim, S. & Cho, W. (1995). Simulation of the drop test of a packaged refrigerator. *Reliability Stress Analysis and Failure Prevention*, 87, 109–116.
- Kisielewiz, L.T., Ando, K. & Endo, M. (1993). Numerical simulation of laptop computer drop tests. *Engineering Systems International of Asia*, 111–119.
- Leijten, J., Harald, E., Bersee, N., Bergsma, K. O. & Beukers, A. (2009). Experimental study of the low-velocity impact behaviour of primary sandwich structures in aircraft. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(2), 164-175. doi:10.1016/j.compositesa.2008.10.019
- Low, K. H., Yang, A., Hoon, K. H., Zhang, X., Lim, J. K. T., Lim, K. L. (2001). Initial study on the drop-impact behavior of mini Hi-Fi audio products. *Advances in Engineering Software* 32, 683-693. doi:10.1016/S0965-9978(01)00024-2
- Lu, C., Li, J., Tse, Y. C. & Wang, Y. Y. (2001). Drop-test simulations for electronic devices with packaging materials. *Joint NCHC-IHPC Seminar*, Taiwan.
- Nagaraj, B. (1997). Drop impact simulation of a custom pager product. *Advanced Electronic Packaging* 1(1997), 539–547.
- Navuria, K., Prakasha, D., Mania, P. B., Kumar, A. E. (2017). Shock Response Analysis of Mechanical Hardware of Flight Data Recorder. *Proceedings*, 4(8), 8000-8009. doi:10.1016/j.matpr.2017.07.137
- Niemer, C. R. (2000). ANSYS Users Meeting, Whirlpool Corp., Evansville In, FIGES.
- Rana, R. A. & Li, R. (2015). Thermal protection from a finite period of heat exposure–Heat survival of flight data recorders. *Applied Thermal Engineering*, 75(22), 748-755. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.09.077
- Schwer, L. E., & Kennedy, J. M. (2000). A Validation case study: Steel billet drop tests and simulations as reported in NUREG/CR-6608. *6th International LS-DYNA Conference*, Dearborn, Michigan, April 9-11.
- Wang, Y. Y., Liu, G.R., Lam, K. Y. & Hua, L. (1998). Numerical simulation of consumer products drop. *Proceedings of the High Performance Computing Conference (HPC'ASIA)*, (pp. 181-185).
- Wang, Y. Y., Lin, T. Y. & Hua, L. (2003). Drop-impact simulation and experimental verification for spindle fixation of video and audio module (VAM). *Mechatronics* 13 (5), 427–440. doi:10.1016/S0957-4158(01)00080-0

Wang, Y. Y., Lu, C., Li, J., Tan, X. M. & Tse, Y.C. (2005). Simulation of drop impact reliability for electronic devices. *Finite Elements in Analysis and Design*, 41, 667-680. doi:10.1016/j.finel.2004.09.001

Tsuruta, G. M. L. (2008). The analysis of flight operational quality assurance (Foqa) Data: Exploration of a proposed list of improved safety parameters, Master's Thesis, Embry-Riddle Aeronautical University Daytona Beach, Florida, USA.

Yeh, M. K. & Huang, T. H. (2014). Drop test and finite element analysis of test board. *Procedia Engineering* 79(2014), 238–243. doi: 10.1016/j.proeng.2014.06.337

Yıldırım, O. (2014). İnsansız Model Helikopterlerin İniş Takımlarının Düşme Testlerinin Deneysel ve Sayısal Analizleri. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

<https://global.britannica.com/technology/flight-recorder> (Erişim Tarihi: 10.12.2016)



Al₂O₃ Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerde Mekanik Alaşımlama Süresinin Korozyon Davranışına Etkilerinin İncelenmesi

The Investigation of Effects of Mechanical Alloying Duration on Corrosion Behavior of Aluminum Composites Reinforced with Al₂O₃

Hasan Karabulut¹ , Kubilay Karacif^{2*} , Ramazan Çıtak³ 

¹Karabük Üniversitesi, TOBB Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 78050 Karabük, TÜRKİYE

²Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 19030 Çorum, TÜRKİYE

³Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06500 Ankara, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 02/01/2019

Kabul/Accepted: 15/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile üretilen alümina (Al₂O₃) takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerde mekanik alaşımlama süresinin tuzlu ortamdaki korozyon davranışına etkileri incelenmiştir. Numunelerin toz metalurjisi yöntemi ile üretiminde, takviye malzemesi olan Al₂O₃ tozları ve ana malzeme olan alüminyum tozları karışımına 1 saat karıştırma veya 2, 4, 6, 10 saat mekanik alaşımlama işlemleri uygulanmıştır. Presleme ve sinterleme işlemleri sonrasında elde edilen Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozit numunelere tuzlu ortamında (%3,5 NaCl) potansiyodinamik yöntem ile elektrokimyasal korozyon testleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, mekanik alaşımlama süresinin artması ile Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemenin korozyon dayanımının azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Mekanik Alaşımlama, Korozyon, Al₂O₃”

Abstract

In the study, the effects of mechanical alloying duration on corrosion behavior of powder metal aluminum composites reinforced with alumina (Al₂O₃) were investigated in saltwater medium. For composite materials production, reinforcement Al₂O₃ powders and base metal aluminum powders were applied one hours mixing or mechanical alloying for 2, 4, 6 and 10 hours. After pressing and sintering treatment of composite powders, electrochemical corrosion tests were applied in saltwater solution (3.5 wt. % NaCl) by potentiodynamic methods. According to corrosion test results, corrosion resistance of composite materials was decreased with increasing of mechanical alloying duration.

Key Words

“Mechanical Alloying, Corrosion, Al₂O₃”

1. Giriş

Kullanım alanı giderek artan alüminyum ve alüminyum alaşımları, hafiflik, yüksek iletkenlik, yüksek korozyon direnci gibi avantajlı özellikler yanında, düşük dayanım, düşük sertlik, düşük aşınma dayanımı gibi dezavantajlı özelliklere sahiptir. Alüminyum alaşımlarının zayıf olan bu mekanik özelliklerini geliştirmek için alüminyum matrise makro boyutta dayanımı yüksek takviye elemanları değişik üretim yöntemleri ile ilave edilerek çok üstün özelliklere sahip alüminyum esaslı kompozit malzemeler üretilmektedir. Alümina (Al_2O_3), silisyumkarbür (SiC), borkarbür (B_4C), silisyumoksit (SiO_2), titanyumoksit (TiO_2), manganoksit (MnO_2), tungstenkarbür (WC), alüminyumnitür (AlN) ve titanyumkarbür (TiC) gibi dayanımı yüksek takviye malzemeleri, alüminyum esaslı kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu takviye malzemeleri içerisinde silisyumkarbür ve alümina, kararlılık, inertlik ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi üstün özellikleri nedeni ile tercih edilmektedir. Gelişen özellikler ile birlikte alüminyum esaslı kompozitlerin kullanım alanları giderek artmaktadır. Ulaşım, havacılık, deniz taşıtları, otomotiv ve maden endüstrisi bu malzemelerin başlıca kullanım alanlarıdır (Ghanaraja vd., 2015, Ghanaraja vd., 2017, Alaneme & Olubambi, 2013, Riahi & Alpas, 2001, Jun vd., 2004, Saraswathi vd., 2006, Qiao vd., 2015, Katkar vd., 2011, Han vd., 2013). Alüminyum esaslı kompozit malzeme üretiminde genellikle karıştırma döküm, spreyc döküm, toz metalurjisi, dövme döküm, infiltrasyon, sıcak haddeleme ve sıcak ekstrüzyon gibi üretim yöntemleri kullanılmaktadır. Kompozit malzemenin istenilen özelliklere sahip olabilmesi için en uygun üretim yöntemi seçilmelidir. Aksi durumda, ana malzeme içerisinde takviye malzemesinin homojen olmayan dağılımı, porozite oluşumu, ana malzeme ve takviye arasında yetersiz ıslatabilirlik gibi hatalar oluşabilmektedir (Shanbhag vd., 2014, De Salazar vd., 1999, Chandrashekar vd., 2018).

Alüminyumun, alüminyum alaşımlarının ve alüminyum esaslı kompozitlerin korozyon davranışında metal yüzeyinde oluşan pasif oksit filmi önemli rol oynamaktadır. Sürekli ve metal yüzeyine iyi yapışmış, gözeneksiz, sıkı, ince pasif oksit filmi, atmosferik ortamda korozyona karşı oldukça yüksek dayanım sağlamaktadır. Fakat gerek alüminyum alaşımlarında gerekse takviye malzeme ile güçlendirilmiş alüminyum esaslı kompozitlerde, özellikle de endüstriyel atmosferde ve deniz atmosferinde bulunan saldırgan tuzlar, koruyucu oksit filminin özelliklerini bozmaktadır. Bu şartlarda SO_2 içeren gazlar ve Cl⁻ iyonları oksit filminin özelliğini kaybetmesinde etkili olmaktadır. Konu ile ilgili az sayıda çalışmada, takviye malzemesi nedeniyle oksit filminin süreksizliği, metal ana malzeme ile takviye ara yüzey reaksiyonları ve intermetalik bileşiklerin oluşumu, kalıntı gerilmeler, seramik partiküller etrafındaki yüksek dislokasyon yoğunluğu sonucunda kompozit malzemenin korozyona karşı hassasiyetinin arttığı bildirilmektedir. Bu şartlarda alüminyum esaslı kompozit malzemelerde bölgesel korozyon, çukur korozyonu ve metal ana malzeme fazı ile seramik partikül sınırlarında seçimli korozyon oluşmaktadır (Dobrzanski vd., 2005, Durai vd., 2008, Zhu & Hihara, 2010, Shimizu vd., 1995, Toptan vd., 2013, Han vd., 2013, Frenkel, 1998).

Al_2O_3 takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin korozyon davranışları ile az sayıda çalışma bulunmaktadır. Alaneme ve Olubambi, Al_2O_3 takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemenin tuzlu ortamda korozyon davranışını inceledikleri çalışmada, malzemeye katılan pirinç kabuğu külünün takviye ile ana malzeme ara yüzeyinde birikmesi nedeniyle korozyon hızını artırdığını bildirmişlerdir (Alaneme & Olubambi., 2013). Hu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, ısıtma işlemi yapılan alüminborat takviyeli alüminyum kompozitin tuzlu ortamda korozyon potansiyelinin çözeltiye alma ısıtma işlemi ile negatif yönde değiştiği görülmüştür. Buna da çözelti ısıtma işlemindeki ara yüzey reaksiyonları neden olmaktadır (Hu vd., 2004). Dobrzanski ve arkadaşları, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Al_2O_3 partikül takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde Al_2O_3 oranı %15 olduğunda kompozitin korozyon hızının arttığını, daha düşük oranlarda Al_2O_3 ilavesinin korozyon özelliklerinde etkili olmadığını bildirmişlerdir (Dobrzanski vd., 2005). Durai ve arkadaşları, Al_2O_3 takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde ana malzemeye az oranlarda mangan ilavesinin korozyon hızını yavaşlattığını belirlemişlerdir (Durai vd., 2008). Deniz suyu ve endüstriyel atmosferde bu tür kompozitin korozyon davranışının incelendiği başka bir çalışmada (Shanbhag vd., 2014), her iki ortamda da kompozitteki Al_2O_3 oranının artması ile korozyon hızının arttığı, deniz suyu ortamında korozyonun daha hızlı olduğu, deniz suyu ortamında çukur korozyonunun, endüstriyel ortamda ise taneler arası korozyonun etkin olduğu belirlenmiştir. Loto ve Babalola yaptıkları çalışmada, nano boyutta %5-10 oranında Al_2O_3 içeren alüminyum kompozitlerde korozyon davranışını incelemişler ve düşük partikül boyutunda korozyon hızının daha yavaş olduğunu görmüşlerdir (Loto & Babalola, 2018). Zhu ve Hihara, Al_2O_3 sürekli fiber ile güçlendirilmiş metal matrisli kompozitlerde korozyon dayanımının, takviye içermeyen alüminyum matris malzemesine göre daha düşük olduğunu, korozyonun fiber ile matris ara yüzeyinde başladığını bildirmişlerdir (Zhu & Hihara, 2010). De Salazar ve arkadaşları, malzemeye uygulanan ısıtma işlemlerin Al_2O_3 takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde korozyon davranışını etkilediklerini belirtmişlerdir (De Salazar vd., 1999). Saxena ve arkadaşlarının çalışmasında bu tür kompozitlerde, mikro çukur ve krater oluşumunun devamında oksit filminin kırılması sonucu korozyonun ilerlediği ve korozyon eğiliminin arttığı görülmüştür (Saxena vd., 1993).

Toz metalurjisi ile kompozit malzeme üretiminde karıştırma veya mekanik alaşımlama işlemi, ana malzeme tozları ile takviye malzemesi tozlarının homojen olarak birbirine karışması ve uygun toz boyutu elde etmek için yapılmaktadır. Mekanik alaşımlama süresi, tozların özelliklerini etkilemekte, bunun sonucunda presleme ve sinterleme işlemleri sonrası elde edilen kompozit malzemenin yapısal özelliklerinin değişimine bağlı olarak malzemenin özellikleri değişmektedir. Mekanik alaşımlama süresinin optimum süreden az veya fazla olması malzeme yapısında ve malzeme özelliklerinde olumsuz etkiler ortaya çıkarmaktadır (Suryanarayana, 2001).

Al_2O_3 takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde yapılan çalışmalar daha çok bu kompozitlerin üretimi ve mekanik özellikleri üzerine yoğunlaşmış olup, korozyon davranışı ile ilgili az sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile üretilen, üretim esnasında karıştırma veya farklı mekanik alaşımlama süreleri uygulanmış, %10 Al_2O_3 takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin %3,5'lük tuzlu su ortamındaki korozyon özellikleri incelenmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. Malzeme ve Metot

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile üretilen %10 Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzeme kullanılmıştır. Alüminyum tozları %99,7 saflıkta ve yaklaşık 70 µm boyutunda, Al₂O₃ tozları ise yaklaşık 15 µm boyutundadır. Numuneler hazırlanırken, alüminyum tozları ve ağırlıkça %10 oranında Al₂O₃ tozları turbula cihazında bilyesiz olarak 1 saat karıştırma (KR) veya atritör cihazında bilyeli olarak 2, 4, 6 ve 10 saat mekanik alaşımlama (MA) işlemlerine tabi tutulmuş, sonrasında 700 MPa gerilme altında presleme ve 600 °C sıcaklıkta argon atmosferinde sinterleme işlemi yapılarak blok numuneler elde edilmiştir. Toz metalurjisi üretim parametreleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen %10 Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzeme numunelerin üretim parametreleri

Malzeme Bileşimi	Karıştırma Alaşımlama Süreleri	Presleme Basıncı	Sinterleme Sıcaklığı ve Ortamı
Al + %10 Al ₂ O ₃	1, 2, 4, 6, 10 saat	700 MPa	600 °C Argon

Üretilen blok numunelerin deneysel yoğunlukları, Arşimet prensibine göre çalışan ve üzerinde 0,0001 gram hassasiyetli yoğunluk kiti bulunan elektronik bir terazi kullanılarak belirlenmiştir. Numunelerin teorik yoğunlukları ise aşağıda verilen karışım kuralına (1) göre hesaplanmıştır.

$$\text{Teorik Yoğunluk} = (\text{Ana Malzeme Yoğunluğu} \times 0,90) + (\text{Takviye Malzemesi Yoğunluğu} \times 0,10) \quad (1)$$

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin gözenek oranları, aşağıda verilen eşitlik (2) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Gözenek} = \frac{\text{Teorik Yoğunluk} - \text{Deneysel Yoğunluk}}{\text{Teorik Yoğunluk}} \times 100 \quad (2)$$

Kompozit numunelerin korozyon testlerinde cam malzemeden yapılmış, üç boyunlu korozyon hücresi kullanılmıştır. Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı malzemeden çalışma elektrotu (anot) hazırlanırken, numunenin 1 cm² yüzeyi açıkta kalacak şekilde diğer yüzeyler epoksi reçine ile kaplanmış, numunenin potansiyostat/galvanostat cihazı ile bağlantısını sağlayacak iletken tel de kalıplama öncesi numuneye eklenmiştir. Karşı elektrot (katot) olarak platin levha, referans elektrot olarak standart kalomel elektrot kullanılmıştır. Korozyon testleri, %3,5 NaCl içeren tuzlu su ortamında yapılmıştır. Korozyon çalışmalarında tüm ölçümler öncesinde numune yüzeyi 1200 numaralı zımpara ile temizlenmiştir. Çalışmalarda öncelikle numunelerin genel korozyon davranışını görmek için -2000 mV ile -300 mV arasında 50 mV/s hızda potansiyel taraması yapılarak akım yoğunluğundaki değişim izlenmiş ve polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Sonrasında Tafel polarizasyon eğrilerini elde etmek için -1400 mV ile -600 mV arasında ikinci tarama yapılmıştır. Elde edilen Tafel polarizasyon eğrilerinden kompozit numunelerin korozyon potansiyelleri, korozyon akımları ve korozyon hızları belirlenmiştir.

2.2. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

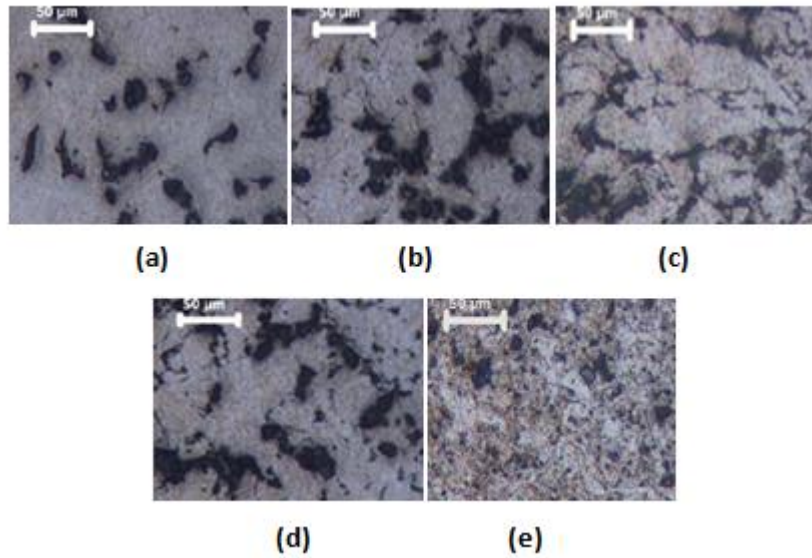
2.2.1. Yoğunluk, Gözenek ve Mikroyapı

Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzeme numunelerinin 1 saat karıştırma ve farklı mekanik alaşımlama sürelerine göre sinterleme sonrası yoğunluk ve gözenek durumları Tablo 2'de verilmektedir. Tabloya göre en iyi yoğunluk değeri 1 saat toz karıştırma ile elde edilen numunede görülmektedir. Bu numunede %97,17 yoğunluk elde edilmiştir. En az gözenek de %2,8 ile bu numunededir. En yüksek yoğunluk ve en düşük gözenek miktarının takviye ve ana malzeme tozlarının 1 saat karıştırılması ile üretilen numunede elde edilmesinde, karıştırma süresinin kısa olması ve turbula cihazında bilyesiz karıştırma yapılması nedeniyle tozlarda fazla deformasyon sertleşmesi olmaması ve bunun sonucunda presleme esnasında sıkıştırılabilirlik özelliğinin iyi olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Mekanik alaşımlama süresi arttıkça kompozit malzemenin yoğunluğu azalmakta, gözenek oranı artmaktadır. En yüksek süre olan 10 saat mekanik alaşımlama yapılan toz karışımı ile elde edilen kompozit numunenin %92,58 yoğunluk ve %7,4 gözenek oranına sahip olduğu görülmektedir. Mekanik alaşımlama süresi arttıkça toz karışımına uygulanan deformasyon miktarı artmakta, bunun sonucunda toz karışımında oluşan deformasyon sertleşmesi de artmaktadır. Toz karışımının sertliğinin artması ise tozların preslenmesi esnasında sıkıştırılabilirlik özelliğini zayıflatmaktadır. Diğer 2, 4 ve 6 saat mekanik alaşımlama sürelerinde ise kompozit malzemelerin yoğunluk ve gözenek oranları orta seviyelerde olmuştur.

Tablo 2. %10 Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzeme numunelerin yoğunluk ve gözenek değerleri

Karıştırma Mekanik Alaşım Süresi	Sinterleme Sonrası Yoğunluk		Gözenek (%)
	(gr/cm ³)	(%)	
1 saat KR	2,75	97,17	2,8
2 saat MA	2,72	96,11	3,8
4 saat MA	2,70	95,40	4,6
6 saat MA	2,70	95,40	4,6
10 saat MA	2,62	92,58	7,4

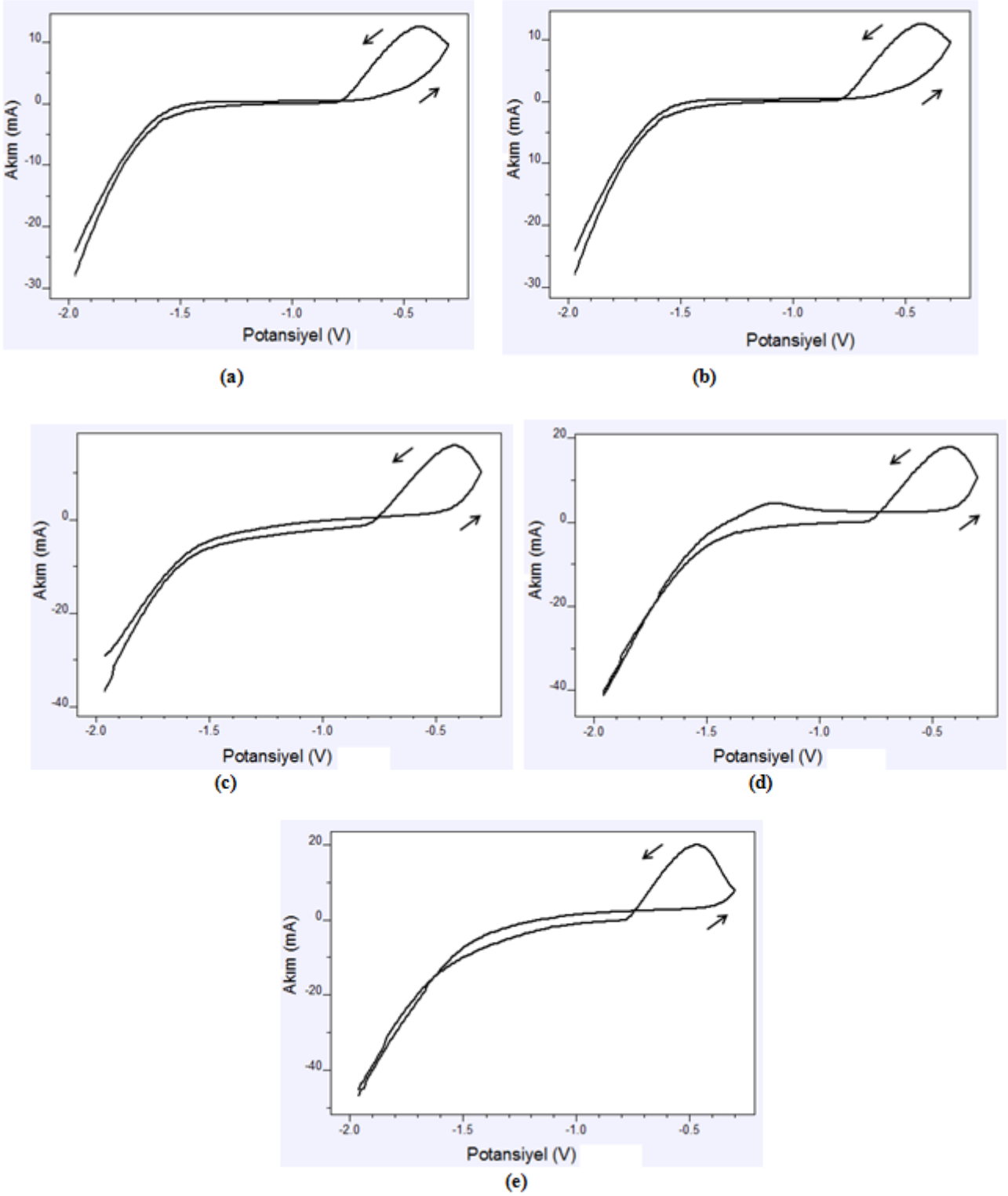
Toz metalurjisi yöntemi ile 1 saat karıştırma veya farklı sürelerde mekanik aşım uygulama uygulanarak üretilen %10 Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozit numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 1'de verilmektedir. Mikroyapı görüntülerinde takviye malzemesinin ana malzeme içerisinde homojen dağıldığı, aşım süresinin artması ile birlikte yapının daha da homojen olduğu görülmektedir. Takviye elemanları 10 saat dışındaki aşım sürelerinde, tane sınırı ve tane sınırı yakınlarında bulunmaktadır. Özellikle 10 saat mekanik aşım uygulanan kompozit numunede parçacıklar daha küçük boyutlu ve her tarafta daha homojen dağılımlıdır. Karabulut ve Çıtak yapmış oldukları çalışmada, 10 saat mekanik aşım yapılmış numunelerde mikro yapıda görülen karartıların SEM ve EDS analizleri sonucunda, kompozitin yapısında herhangi bir reaksiyon ürünü faz oluşmadığını belirlemişlerdir (Karabulut & Çıtak, 2011). Aynı araştırmacıların yapmış oldukları başka çalışmalarda, mekanik aşım ile üretilmiş kompozitlerin mekanik aşım yapılmamış kompozitlere göre daha sert olduğu, çapraz kırılma dayanımlarının da çok daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Karabulut & Çıtak, 2011, Karabulut vd., 2013).



Şekil 1. (a) 1 saat karıştırma, (b) 2 saat, (c) 4 saat, (d) 6 saat, (e) 10 saat mekanik aşım ile üretilen %10 Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin mikroyapıları

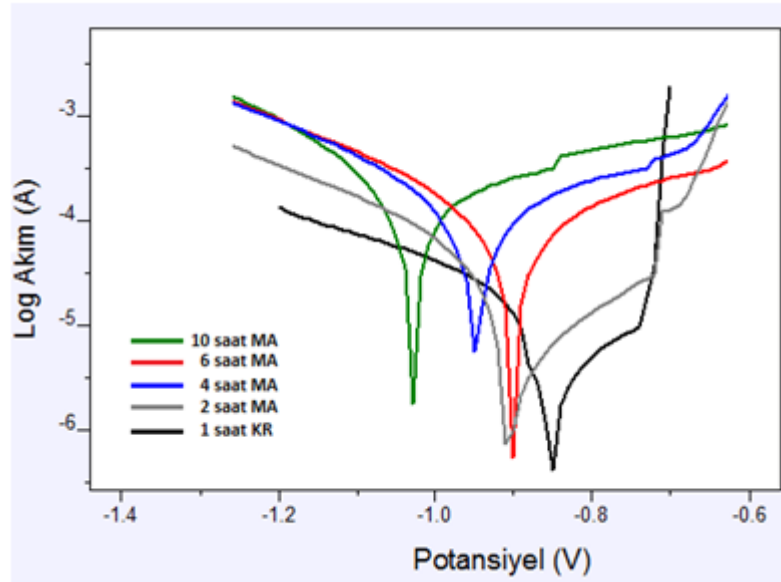
2.2.2. Korozyon Davranışı

Potansiyodinamik yöntem ile kompozit numunelere katodik yönden anodik yöne doğru -2000 mV ile -300 mV arasında uygulanan potansiyel taraması esnasında akımda meydana gelen değişimler Şekil 2'de polarizasyon eğrilerinde verilmektedir. Polarizasyon eğrilerinde katodik bölgeden anodik bölgeye gidiş ve tekrar katodik bölgeye dönüş yönleri oklar ile gösterilmiştir. 1 saat karıştırma ve 2 saat mekanik aşım ile üretilen kompozit numunelerde -600 mV potansiyel değerlerine kadar akım düşük seviyelerdedir, yani korozyona karşı alüminyum kompozit malzemenin direnç gösterdiği görülmektedir. Bu numunelerde -600 mV değerinden sonra akım artış göstermekte ve korozyon başlamaktadır. 4, 6 ve 10 saat mekanik aşım ile üretilen kompozit numunelerde ise akım artışı ve korozyon, daha negatif potansiyellerde yani daha erken başlamaktadır. Akım artışının daha negatif potansiyellerde başlaması malzemenin korozyon dayanımının düşük olduğunun göstergesidir. Malzemede akım artışı ne kadar pozitif yöndeki yüksek potansiyellerde başlarsa korozyona karşı direnç o kadar iyidir. Potansiyel taramalarında yüksek potansiyellerde gidiş ve dönüş halkalarının birbirine yakın olması, yani gidiş ve dönüş akım değerlerinin birbirine yakın olması yüzeyde fazla bozunma olmadığını göstermektedir. Bu halkaların geniş olması ise gidiş sırasında akımın dönüşte daha fazla arttığını göstermektedir. Yüksek akım, korozyon şiddetinin bir göstergesidir. Buna göre polarizasyon eğrilerinde 4, 6 ve 10 saat mekanik aşım ile üretilen numunelerde akım şiddetinin ve korozyonun daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 2. (a) 1 saat karıştırma, (b) 2 saat, (c) 4 saat, (d) 6 saat, (e) 10 saat mekanik alaşımlama ile üretilen %10 Al₂O₃ takviyeli alüminyum kompozit numunelerin %3,5 NaCl çözeltisinde polarizasyon eğrileri

Karıştırma veya farklı alaşımlama süreleri ile üretilen %10 Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozit numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri Şekil 3'de, Tafel polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon potansiyeli, korozyon akımı ve korozyon hızı değerleri Tablo 3'de verilmektedir.



Şekil 3. Karıştırma ve farklı sürelerde mekanik alaşımlama yapılan %10 Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin %3,5 NaCl ortamında Tafel polarizasyon eğrileri

Tablo 3. Karıştırma ve farklı sürelerde mekanik alaşımlama yapılan %10 Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin %3,5 NaCl ortamında korozyon değerleri

Karıştırma Mekanik Alaşımlama Süresi	Korozyon Potansiyeli (mV)	Korozyon Akımı (A)	Korozyon Hızı (mm/y)
1 saat KR	-855	$2,83 \cdot 10^{-6}$	0,030
2 saat MA	-890	$5,30 \cdot 10^{-6}$	0,057
4 saat MA	-951	$9,60 \cdot 10^{-5}$	1,047
6 saat MA	-911	$9,53 \cdot 10^{-5}$	1,039
10 saat MA	-1026	$16,23 \cdot 10^{-5}$	1,770

Elektrokimyasal korozyon olayında pil hücresinde yükseltgenme sonucu oluşan elektronlar anottan katoda doğru hareket ederken, katottan anoda doğru da bir elektrik akımı oluşmaktadır. Korozyon sırasında oluşan akım ne kadar fazla ise malzemede oluşan korozyon ve bunun sonucunda korozyon nedeniyle çözünen madde miktarı da o kadar fazladır. Tafel polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon akımı değerleri de malzemenin korozyon davranışının ve korozyon hızının belirlenmesinde temel parametrelerden birisidir. Malzemenin korozyon akımının küçük olması korozyon hızının düşük olduğunu, malzemenin korozyon akımının büyük olması da korozyon hızının yüksek olduğunu ifade etmektedir. Buna göre $2,83 \cdot 10^{-6}$ amper korozyon akımı ve 0,030 mm/y korozyon hızı ile korozyona karşı en iyi dayanımı, takviye malzemesi ve ana malzeme tozlarının 1 saat karıştırılması ile üretilen kompozit numune göstermektedir. 2 saat karıştırma durumunda korozyon akımı $5,30 \cdot 10^{-6}$ amper ve korozyon hızı 0,057 mm/y olarak görülmektedir. Mekanik alaşımlama süresinin artması ile birlikte kompozit numunelerin korozyon akımları ve korozyon hızları artmakta, korozyon dayanımları azalmaktadır. Özellikle en yüksek alaşımlama süresi olan 10 saat mekanik alaşımlama işlemi ile üretilen numunede en yüksek korozyon akımı olarak $16,23 \cdot 10^{-5}$ amper ve en yüksek korozyon hızı olarak 1,770 mm/y belirlenmiştir.

Alüminyum alaşımlarının ve alüminyum esaslı kompozit malzemelerin korozyon davranışları ile ilgili çalışmalarda, alüminyum esaslı kompozitlerde korozyon dayanımının saf alüminyuma göre daha zayıf olduğu, kompozit malzemelerde takviye oranının artması ile korozyon dayanımının daha da azaldığı bildirilmektedir. Alüminyum metalinin korozyon dayanımında yüzeyde oluşan pasif alüminyumoksit filmi çok önemlidir ve uygun ortamlarda korozyona karşı dayanımı sağlayan sürekli ve yüzeye iyi yapışan bu pasif oksit filmidir. Alüminyum esaslı kompozitlerde ise farklı elektrokimyasal özelliklere sahip takviye malzemeleri nedeni ile pasif oksit filmin oluşumunda süreklilik bozulmaktadır (Dobrzanski vd., 2005, Durai vd., 2008, Zhu & Hihara, 2010, Shimizu vd., 1995, Toptan vd., 2013, Han vd., 2013, Frenkel, 1998). Bu çalışmada da takviye malzemesi olarak alüminyuma göre çok farklı elektrokimyasal özelliklere sahip olan Al₂O₃ partiküllerinin yüzeyde oluşan pasif oksit filmin sürekliliğini bozduğu düşünülmektedir. Ayrıca korozyon çalışmalarının yapıldığı tuzlu su ortamı, içerdiği saldırgan özellikteki klorür iyonları nedeni ile pasif filmin sürekliliğini bozan bir diğer etkidir.

Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin toz metalürjisi yöntemi ile üretiminde ana malzeme ve takviye toz karışımına farklı sürelerde uygulanan mekanik alaşımlama işlemi ile kompozit malzemenin korozyon davranışının çok fazla etkilendiği görülmektedir. Toz karışımının 1 saat karıştırılması ile üretilen numunede 0.030 mm/y olan korozyon hızı, toz

karışımına 10 saat mekanik alaşımlama uygulanması durumunda 1.770 mm/y olmaktadır. Korozyon hızındaki bu olumsuz değişim çok ciddi bir artıştır. Aynı takviye oranlarında, farklı mekanik alaşımlama sürelerinde kompozit malzemenin korozyon dayanımındaki bu şiddetli değişimin nedeni malzemenin yapısal durumudur. Bilindiği gibi malzemelerde işlem-yapı-özellik ilişkisi bulunmaktadır. Bu ilişkiye göre malzemelerin üretim esnasında görmüş oldukları işlemlere göre malzeme yapısı oluşmakta, bu farklı yapılaraya göre de malzeme özellikleri değişmektedir. Buna göre farklı parametreler ile üretilen numunelerde farklı korozyon hızlarının oluşmasını açıklamak için kompozit numunelerin yapısal durumlarına bakmak gerekir. Uygulanan mekanik alaşımlama süresine göre kompozit malzemelerin yapısal özelliklerinden olan yoğunluk ve gözenek durumlarını gösteren Tablo 2 incelendiğinde, uygulanan mekanik alaşımlama süresinin artması ile kompozit malzemede gözenek oranının arttığı görülmektedir. Malzemelerin korozyon davranışlarında gözenek yapısı oldukça etkilidir. Malzemenin hem iç kısımlarında hem de yüzeylerinde bulunan gözenekler, takviye elemanlarının yaptığı gibi hem pasif oksit filmin oluşumunda sürekliliği olumsuz etkilemekte hem de malzemenin korozyon dayanımını zayıflatmaktadır.

Mekanik alaşımlama süresinin diğer bir etkisi de karıştırılan tozların sertlikleri, kırılgenlikleri ve boyutları üzerine olmaktadır. Mekanik alaşımlama süresinin artması ile birlikte karıştırılan tozların deformasyon sertleşmesi etkisi sonucunda sertlikleri ve kırılgenlikleri artmakta, bu nedenle de tozların tane boyutları azalmaktadır. Toz tane boyutlarının küçülmesi ile birlikte kompozit malzemenin tane yapısı da küçülmekte, malzeme yapısındaki toplam tane sınırı alanı da artmaktadır. Malzemelerde tane sınırları yüzeysel hatalar olup, atom dizilişi yönlenme farkı, tane içine göre kimyasal bileşim farklılıkları, bazı bileşiklerin oluşum yerleri gibi etkilere sahiptir. Tane içleri ile tane sınırları arasındaki bu durum, korozyon esnasında bir potansiyel farkı oluşturarak korozyon hızını artırmakta ve korozyon dayanımını zayıflatmaktadır. Buna göre mekanik alaşımlama süresinin artması ile birlikte, belirtilen etkilerin sonucunda toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Al_2O_3 takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemenin korozyon hızı artmakta, korozyon dayanımı azalmaktadır.

3. Sonuçlar

Takviye ve ana malzeme tozlarına karıştırma veya farklı sürelerde mekanik alaşımlama yapılarak toz metalurjisi yöntemi ile üretilen %10 Al_2O_3 ile güçlendirilmiş alüminyum esaslı kompozitlerin tuzlu ortamda (%3,5 NaCl) korozyon davranışlarının incelendiği bu çalışma sonucunda aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Al_2O_3 takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemenin tuzlu ortamdaki polarizasyon eğrilerine göre 1 saat karıştırma ve 2 saat mekanik alaşımlama ile üretilen numuneler, daha yüksek süre mekanik alaşımlama yapılan numunelere göre daha pozitif yöndeki potansiyellere kadar akım kararlılıklarını korumuşlardır.
2. Polarizasyon eğrilerine göre 4, 6 ve 10 saat mekanik alaşımlama ile üretilen numunelerde potansiyel halkaları daha geniş, akım şiddeti daha fazladır. Buna göre bu kompozit numunelerde korozyon daha şiddetlidir.
3. Tafel polarizasyon eğrilerine göre mekanik alaşımlama süresi arttıkça kompozit numunelerin korozyon akımı ve buna bağlı olarak korozyon hızı artmakta, korozyon dayanımı azalmaktadır. En düşük korozyon hızı, Al_2O_3 takviye ve alüminyum ana malzeme toz karışımına 1 saat karıştırma uygulanan kompozit numunede, en yüksek korozyon hızı ise toz karışımına 10 saat mekanik alaşımlama uygulanan numunede elde edilmiştir.
4. Mekanik alaşımlama süresinin artması ile Al_2O_3 takviyeli alüminyum esaslı kompozitin korozyon hızının artıp korozyon dayanımının azalması, mekanik alaşımlama süresinin artması ile birlikte tozların pekleşmesinden dolayı sıkıştırılabilirlik özelliklerinin azalması sonucunda gözenek oranının artmasının etkili olmasına atfedilmektedir.
5. Mekanik alaşımlama süresinin artması ile pekleşme ve kırılgenlik artışı nedeniyle Al_2O_3 tozları ve alüminyum tozlarının boyutlarının küçülmesi, bunun sonucunda toplam tane sınırı alanı artışının da korozyon hızını artırıcı, korozyon dayanımını azaltıcı yönde etki yaptığı düşünülmektedir.

Referanslar

- Alaneme, K.K., Olubambi, P.A. (2013). Corrosion and wear behaviour of rice husk ash-alumina reinforced Al-Mg-Si alloy matrix hybrid composites. *Journal of Materials Research Technology*, 2, 188-194. doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.005
- Chandrashekar A, Ajaykumar, B.S., Reddappa, H.N. (2018). Mechanical, structural and corrosion behaviour of AlMg4.5/Nano Al_2O_3 metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 5, 2811-2817. doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.069
- De Salazar, J.M.G., Urena, A., Manzanedo, S. and Barrena, M.I. (1999). Corrosion behavior of AA6061 and AA7005 reinforced with Al_2O_3 particles in aerated %3.5 chloride solutions: potentiodynamic measurements and microstructure evaluation. *Corrosion Science*, 41, 529-545.
- Dobrzanski, L.A., Włodarczyk, A. and Adamiak, M. (2005). Structure, properties and corrosion resistance of PM composite materials based on EN AW-2124 aluminum alloy reinforced with the Al_2O_3 ceramic particles. *Journal of Materials Processing Technology*, 162, 27-32. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.006
- Durai, T.G., Das, K., Das, S. (2008). Corrosion behavior of Al-Zn/ Al_2O_3 and Al-Zn-X/ Al_2O_3 composites synthesized by mechanical-thermal treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 462, 410-415. doi: 10.1016/j.jallcom.2007.08.073

- Frankel, G.S. (1998). Pitting corrosion of metals; a summary of the critical factors. *Journal of Electrochemical Society*, 145, 2186-2198. doi:10.1149/1.1838615
- Ghanaraja, S., Vinuth Kumar, K.L., Raju, H.P., Ravikumar, K.S. (2015). Processing and mechanical properties of hot extruded Al (Mg)-Al₂O₃ composites. *Materials Today: Proceedings*, 2, 1291-1300. doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.045
- Ghanaraja, S., Vinuth Kumar, K.L., Ravikumar, K.S., Madhusudan, B.M. (2017). Mechanical properties of Al₂O₃ reinforced cast and hot extruded Al based metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 4, 2771-2776. doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.155
- Han, Y.M., Gallant, D. and Chen, X.G. (2013). Galvanic corrosion associated with Al-B₄C composites/SS304 and Al-B₄C composites/AA6061 couples in NaCl and H₃BO₃ solutions. *Electrochimica Acta*, 94, 134-142. doi: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.01.115
- Han, Y.M., Gallant, D., Chen, X.G. (2013). Corrosion inhibition of Al-B₄C metal matrix composites in a NaCl solution by benzotriazole. *Materials Chemistry and Physics*, 139, 187-195. doi: 10.1016/j.matchemphys.2013.01.021
- Hu, J., Chu, W.Y., Fei, W.D. and Zhao, L.C. (2004). Effect of interfacial reaction on corrosion behavior of alumina borate whisker reinforced 6061 Al composite. *Materials Science and Engineering A*, 374, 153-159. doi: 10.1016/j.msea.2004.01.028
- Katkar, V.A., Gunasekaran, G., Rao, A.G. and Koli, P.M. (2011). Effect of the reinforced boron carbide particulate content of AA6061 alloy on formation of the passive film in seawater. *Corrosion Science*, 53, 2700-2712. doi: 10.1016/j.corsci.2011.04.023
- Karabulut, H., Çıtak, R. (2011). Al Matrisli ve Al₂O₃ Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Farklı Mekanik Aşım Sürelerinde Üretilmesi ve Karakterize Edilmesi. 6. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı ve Sergisi, Ankara, 727-732.
- Karabulut, H., Çıtak, R. (2011). Al Matrisli ve Al₂O₃ Parçacık Takviyeli Kompozitler için Üretim Yönteminin Kompozit Özelliklerine Etkisi. 6. International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, 503-506.
- Karabulut, H., Çıtak, R., Çinici, H. (2013). Mekanik Aşım Süresinin Al+%10Al₂O₃ Kompozitlerde Eğme Dayanımına Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28, 3, 635-643.
- Loto, R.T., Babalola, P. (2018). Effect of alumina nano-particle size and weight content on the corrosion resistance of AA1070 aluminum in chloride/sulphate solution. *Results in Physics*, doi: https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.07.025.
- Jun D., Liu, Y.H., Yu, S.R. and Li, W.F. (2004). Dry sliding friction and wear properties of Al₂O₃ and carbon short fibres reinforced Al-12Si alloy hybrid composites. *Wear*, 257, 930-940. doi:10.1016/j.wear.2004.05.009
- Qiao, Y., Qu, L., Zhang, X. and Zhang, H. (2015). Boron carbide composite ceramic preparation and corrosion behavior in simulated seawater. *Ceramics International*, 41, 5026-5031. doi: 10.1016/j.ceramint.2014.12.070
- Riahi, A.R. and Alpas, A.T. (2001). The role of tribo-layers on the sliding wear behavior of graphitic aluminum matrix composites. *Wear*, 251, 1396-1407. doi: 10.1016/S0043-1648(01)00796-7
- Saxena, M., Modi, O.P., Prasad, B.K., Jha, A.K.. (1993). Erosion and corrosion characteristics of an aluminum alloy-alumina fibre composite. *Wear*, 169,1(1), 119-124. doi.org/10.1016/0043-1648(93)90397-5
- Saraswathi, Y.L., Das, S. and Mondal, D.P. (2006). Influence of microstructure and experimental parameters on the erosion-corrosion behavior of Al alloy composites. *Materials Science and Engineering A*, 425, 244-254. doi:10.1016/j.msea.2006.03.083
- Shanbhag, V.V., Yalamoori, N.N., Karthikeyan, S., Ramanujam, R., Venkatesan, K.,. (2014). Fabrication, surface morphology and corrosion investigation of Al 7075-Al₂O₃ matrix composite in seawater and industrial environment. *Procedia Engineering*, 97, 607-613. doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.289
- Shimizu, Y., Nishimura, T., Matsushima, I. (1995). Corrosion resistance of Al-based metal matrix composites. *Materials Science and Engineering A*, 198, 113-118.
- Suryanarayana, C. (2001). Mechanical Alloying and Milling. *Progress in Materials Science*, 46, 1-184. doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9
- Toptan, F., Alves, A.C., Kerti, I., Ariza, E., Rocha, L.A. (2013). Corrosion and tribocorrosion behaviour of Al-Si-Cu-Mg alloy and its composites reinforced with B₄C particles in 0.05M NaCl solution. *Wear*, 306, 27-35. doi: 10.1016/j.wear.2013.06.026
- Zhu, J., Hihara, L.H. (2010). Corrosion of continuous alumina-fibre reinforced Al-2 wt.% Cu-T6 metal matrix composite in 3.15 wt.% NaCl solution. *Corrosion Science*, 52, 406-415. doi:10.1016/j.corsci.2009.09.028



Betonarme Kolonların Şekil Değişirme Esaslı Hasar Sınırlarının Araştırılması

Investigation of Deformation Based Damage Limits of Reinforced Concrete Column

Saeid Foroughi ^{*1} , S. Bahadır Yüksel ¹ 

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya / TÜRKİYE

Başvuru/Received: 28/02/2019

Kabul/Accepted: 24/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Yapısal elemanların deprem performansının belirlenmesi için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'de betonarme elemanlar için öngörülen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları analitik olarak incelenmiştir. Farklı geometri ve parametrelerde betonarme kolon modelleri tasarlanmıştır. Gerçek malzeme davranışları esas alınarak elde edilen momenti-eğrilik ilişkilerinden kolon kesitlerinin elastik ötesi davranışları incelenmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'de verilen hasar sınırları betonarme kolon modelleri için hesaplanmıştır. Betonarme kolonlarda üç farklı hasar sınırına karşı gelen birim şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Şekil değiştirme değerleri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'de tanımlanmış olan Göçmenin Önlenmesi, Kontrollü Hasar ve Sınırlı Hasar Performans seviyeleri için hesaplanmıştır. Yer değiştirme taleplerine karşılık gelen kolon hasarları elde edilmiş ve hasar sınırları değerlendirilmiştir. Farklı performans düzeyleri için kolonların plastik mafsallık bölgeleri için akma dönme değerleri ve plastik dönme değerleri hesaplanmıştır. Plastik mafsallık bölgeleri için akma dönme değerleri eksenel yük seviyesi, boyuna donatı ve sargı donatı çapının artması ile artmaktadır. Göçmenin Önlenmesi ve Kontrollü Hasar performans düzeyleri için plastik dönmelerin hasar sınırları; akma eğriliği, kopma eğriliği, plastik mafsallık uzunluğu, kesme açıklığı ve boyuna donatı çapının fonksiyonudur. Eksenel yük seviyesi, sargı donatısı ve boyuna donatı oranı gibi, akma eğriliği ve göçme öncesi eğrilik değerlerini etkileyen parametreler plastik dönme değerlerinde etkilemektedir.

Anahtar Kelimeler

“Moment-eğrilik, Performans düzeyi, Hasar sınırları, Birim şekil değiştirme sınırları, İç kuvvet sınırları, plastik dönme”

Abstract

Deformation based damage limits for reinforced concrete members, which were mentioned in Turkish Building Earthquake Code 2018 has been studied analytically to determine the earthquake performance of structural members. Reinforced concrete column models were designed in different geometry and parameters. Inelastic behavior of column sections were investigated using the moment-curvature relationships obtained based on real material behaviors. Damage limit values given in Turkish Building Earthquake Code, 2018 were calculated for the reinforced concrete column models. Strain values corresponding to three different damage limits for the columns were calculated. The deformation limits were calculated for the levels of collapse prevention, controlled damage and limited damage performance levels as defined in Turkish Building Earthquake Code, 2018. Column damages corresponding to the displacement demands was obtained and the damage limits were evaluated. For different performance levels, yield rotation and plastic rotation values were calculated for the plastic hinge regions of the columns. The yield rotation values for plastic hinge regions increase with the increasing in axial load level, longitudinal and transverse reinforcement diameters. Damage limits of plastic rotations for collapse prevention and controlled damage performance levels are functions of yield curvature, ultimate curvature, plastic hinge length, shear length and the diameter of the longitudinal reinforcement. Parameters such as axial load level, transverse reinforcement and longitudinal reinforcement ratio, which influence the yield curvature and ultimate curvature values, also affect the plastic rotation values.

Key Words

“Moment-curvature, Performance level, Damage limits, Strain limits, Internal force limits, Plastic rotation”

1. Giriş

Performansa dayalı tasarım en genel haliyle, bir yapının tasarım depremi etkisinde belirli bir yapısal performans, bir başka deyişle hasar öngörülerek şekil değiştirmeye dayalı tasarım yöntemleri de kullanılarak tasarlanmaktadır. Son yıllarda, özellikle mevcut yapıların değerlendirilmesinde, kuvvete dayalı tasarım yöntemleri yerine şekil değiştirme esaslı tasarım yöntemleri giderek yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Şekil değiştirme esaslı tasarım yöntemleri; malzemenin elastik ötesi davranışını hesaba katmaktadır. Elde edilen şekil değiştirme ve iç kuvvet talepleri öngörülen performans hedefleri ile uyumlu olarak tanımlanan şekil değiştirme ve dayanım kapasiteleri ile karşılaştırılır (Aydemir vd., 2011).

“Performansa dayalı tasarım temelde üç parametreden oluşmaktadır. Bunlar kapasite, talep ve performanstır. Kapasite; binanın taşıyıcı sistemi, malzemesi, kesit geometrisi vb. unsurların bir bileşkesi olarak düşünülebilir. Binanın yatay yer değiştirebilme kapasitesi (süneklik) ve yatay yük taşıma kapasitesi (rijitlik) genel anlamda kapasite olarak tanımlanır” (Celep ve Kumbasar, 2004). “Talep; sismik hareketlerin yapıdan karşılaşmasını istediği yer değiştirme ve kesit tesirleri olarak tanımlanabilir. Performans ise yapının kapasitesinin sismik talepleri hangi oranda karşılayabileceği ile ilgilidir” (Çavdar vd., 2015).

Deprem etkisi altında mevcut binaların yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme analizleri için kullanılacak doğrusal elastik olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme talepleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet taleplerinin hesaplanmasıdır (Sinani, 2014).

Doğrusal olmayan hesap yöntemleriyle hesaplanan iç kuvvetlerin veya şekil değiştirmelerin, kesit hasar sınırlarına karşı gelmek üzere tanımlanan sayısal değerler ile karşılaştırılması sonucunda kesitlerin hangi hasar bölgelerinde olduğuna karar verilir. Eleman hasarı, elemanın en fazla hasar gören kesitine göre belirlenir. Mevcut veya güçlendirilmiş binaların deprem etkisi altında yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme hesapları için kullanılacak doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme ve plastik dönme talepleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet taleplerinin hesaplanmasıdır. Daha sonra bu talep büyüklükleri, şekil değiştirme ve iç kuvvet kapasiteleri ile karşılaştırılarak kesit ve bina düzeyinde yapısal performans değerlendirmesi yapılır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)’de tanımlanan yapı elemanlarında hasar sınırları ve hasar bölgeleri (kesit hasar durumları) sünek elemanlar için kesit düzeyinde üç hasar durumu ve hasar sınırı tanımlanmıştır. Bunlar Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Öncesi Hasar (GÖ) durumları ve bunların sınır değerleridir. Sınırlı hasar ilgili kesitte sınırlı miktarda elastik ötesi davranış, kontrollü hasar kesit dayanımının güvenli olarak sağlanabileceği elastik ötesi davranış, göçme öncesi hasar durumu ise kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranış tanımlanmaktadır. Gevrek olarak hasar gören elemanlarda bu sınıflandırma geçerli değildir (TBDY, 2018).

1.1. TBDY, 2018’e göre İzin Verilen Şekil Değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları

Göçmenin Önlenmesi Performans Düzeyi (GÖ), Kontrollü Hasar Performans Düzeyi (KH) ve Sınırlı Hasar Performans Düzeyi (SH) için yapılacak performans değerlendirmesinde kullanılmak üzere, yüksek binalar ve yeni betonarme bina elemanlarında yaygın plastik davranış modeline göre hesaplanan beton ve donatı çeliği toplam birim şekil değiştirmeleri için izin verilen sınırlar Çizelge (1)’de tanımlanmıştır.

Çizelge 1. Farklı performans düzeylerine göre beton ve donatı çeliği toplam birim şekil değiştirmeleri (TBDY, 2018)

Şekil değiştirme ve iç kuvvet sınırları	Hasar sınırı	
	Betonda birim kısalma	Donatıda birim kısalma ve uzama
Göçmenin Önlenmesi (GÖ)	a) $\epsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.04\sqrt{\omega_{we}} \leq 0.018$	$\epsilon_s^{(GÖ)} = 0.40\epsilon_{su}$
	b) $\epsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.07\sqrt{\omega_{we}} \leq 0.018$	
Kontrollü Hasar (KH)	$\epsilon_c^{(KH)} = 0.75\epsilon_c^{(GÖ)}$	$\epsilon_s^{(KH)} = 0.75\epsilon_s^{(GÖ)}$
Sınırlı Hasar (SH)	$\epsilon_c^{(SH)}=0.0025$	$\epsilon_s^{(SH)}=0.0075$

a) Dikdörtgen kesitli kolon, giriş ve perdeler, b) Dairesel kesitli kolonlar
 ϵ_{su} Donatının çekme dayanımına karşı gelen birim uzamayı göstermektedir
 ω_{we} Etkin sargı donatısının mekanik donatı oranını göstermektedir

Etkin sargı donatısının mekanik donatı oranı Denklem (1)’den hesaplanmaktadır.

$$\omega_{we} = \alpha_{se} \rho_{sh, \min} \frac{f_{ywe}}{f_{ce}} \quad (1)$$

Denklem (1)’de: α_{se} sargı donatısı etkinlik katsayısını, $\rho_{sh, \min}$ dikdörtgen kesitte iki yatay doğrultuda hacimsel enine donatı oranının küçük olanını, f_{ywe} enine donatının ortalama (beklenen) akma dayanımıdır. Dikdörtgen sargı donatısının etkinlik katsayısı (α_{se}) Denklem (2) ve hacimsel enine donatı oranı (ρ_{sh}) Denklem (3) ile hesaplanmaktadır.

$$\alpha_{se} = \left(1 - \frac{\sum a_i^2}{6b_o h_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) \quad (2)$$

$$\rho_{sh} = \frac{A_{sh}}{b_k s} \quad (3)$$

A_{sh} ve ρ_{sh} gözönüne alınan doğrultuda enine donatının alanını ve hacimsel oranını, b_k dik doğrultudaki çekirdek boyutunu (en dıştaki enine donatı eksenleri arasındaki uzaklık), s enine donatı aralığını, b_o ve h_o sargı donatısı eksenlerinden ölçülen sargılı beton boyutlarını, a_i bir etriye kolu veya çiroz tarafından mesnetlenen boyuna donatıların eksenleri arasındaki uzaklığı göstermektedir. Dairesel kesitli elemanlarda dairese sargı donatısının etkinlik katsayısı Denklem (4)'te ve dairese/spiral sargı donatısının hacimsel oranı Denklem (5)'te verilmiştir.

$$\alpha_{se} = \left(1 - \frac{s}{2D}\right)^n \quad (4)$$

$$\rho_{sh} = \frac{2A_{os}}{D_s} \quad (5)$$

Burada A_{os} spiral/sargı donatısının alanı, s enine donatı aralığı veya spiralin adımı, D ise spiral/sargı donatısı eksenleri arasındaki uzaklıktır. Dairesel etriye için $n=2$, spiral donatı için $n=1$ alınacaktır. GÖ, KH ve SH için yapılacak performans değerlendirmesinde kullanılmak üzere, yüksek binalar da dâhil olmak üzere, yeni betonarme bina elemanlarında yığılı plastik davranış modeline göre hesaplanan plastik dönmeler için izin verilen sınır, kesite etkiyen eksenel kuvvet, beton ve donatı çeliği modelleri dikkate alınarak yapılacak eğrilik analizi sonucunda Çizelge (2)'de verilen denklemler ile hesaplanmıştır.

Çizelge 2. Farklı performans düzeylerine göre plastik dönmeleri (TBDY, 2018)

Şekil Değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Yığılı Plastik Davranış Modeline göre Hesaplanan Plastik Dönmeler
Göçmenin Önlenmesi (GÖ)	$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} \left[(\phi_u - \phi_y) L_p \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s}\right) + 4.5 \phi_u d_b \right]$
Kontrollü Hasar (KH)	$\theta_p^{(KH)} = 0.75 \theta_p^{(GÖ)}$
Sınırlı Hasar (SH)	$\theta_p^{(SH)} = 0$
ϕ_u , Göçme öncesi eğrilik ϕ_y , Akma eğriliği L_p , Plastik mafsalsal boyu	L_s , Kesme açıklığı d_b , Boyuna donatı çapı

Etkin kesit rijitlikleri kullanılarak yapılan hesapta Sınırlı Hasar Performans düzeyi için taşıyıcı sistemde plastik mafsalsal oluşumuna izin verilmeyecektir. Akma durumu için yer değiştirmiş plastik mafsalsal akma dönmeleri (θ_y) Denklem (6) ile hesaplanmıştır. Kiriş ve kolonlarda $\eta = 1$, perdelerde ise $\eta = 0.5$ alınacaktır. Yeni yapılacak binaların şekil değiştirmeye göre değerlendirilme ve tasarımında beton ve donatı çeliği için TBDY, (2018)'de tanımlanan beklenen (ortalama) dayanımları esas alınacaktır. Beton ve donatı çeliği için tanımlanan beklenen (ortalama) dayanımları Denklem (7)'de verilmiştir. Denklemde; f_{ce} ve f_{ck} sırasıyla betonun ortalama ve karakteristik basınç dayanımlarını, f_{ye} ve f_{yk} ise sırasıyla çeliğin ortalama ve karakteristik akma dayanımlarını göstermektedir.

$$\theta_y = \frac{\phi_y L_s}{3} + 0.0015 \eta \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s}\right) + \frac{\phi_y d_b f_{ye}}{8 \sqrt{f_{ce}}} \quad (6)$$

$$(f_{ce} = 1.3 f_{ck}), \quad (f_{ye} = 1.2 f_{yk}) \quad (7)$$

Bu çalışmada betonarme yapısal elemanların deprem performansının belirlenmesi için TBDY, (2018)'de verilen kurallara göre farklı parametrelere ve geometriye sahip 18 adet betonarme kolon modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan betonarme kolon modellerinin kesit görünüşü ve donatı yerleşim planı Şekil (1)'de ve kolon modellerine ait kesit özellikleri Çizelge (3)'te verilmiştir. Tasarlanan betonarme kolon kesitlerinde gerçek malzeme davranışları esas alınarak farklı parametrelere göre (farklı parametre olarak; boyuna donatı çapı, sargı donatı çapı, sargı donatı aralığı ve eksenel yük seviyesi) analizlerden elde edilen moment-eğrilik ilişkilerinden akma eğriliği (ϕ_y), akma momenti (M_y), göçme öncesi eğrilik (ϕ_u), eğilme momenti kapasitesi (M_u) ve eğrilik sünekliği (μ) değerleri hesaplanmıştır. Betonarme kolon modellerinin moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen veriler kullanılarak kolon kesitlerinin davranışları incelenmiştir. Betonarme kolonların davranışı, malzemelerin doğrusal olmayan davranışları göz önüne alınarak farklı parametreler için moment-eğrilik ilişkileri SAP2000 (Ver.20.2.0) programı ile elde edilmiştir. Betonarme kesitlerde süneklik, kesitin dayanımında önemli bir azalma olmadan yapabileceği doğrusal ötesi deformasyon kapasitesi olarak tanımlanır. Sayısal olarak süneklik, eğrilik süneklik katsayısı (μ) ile ifade edilir. Eğrilik süneklik katsayısı (μ), moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen göçme öncesi eğriliğin (ϕ_u) akma eğriliğine (ϕ_y) oranı olarak Denklem (8) ile hesaplanır.

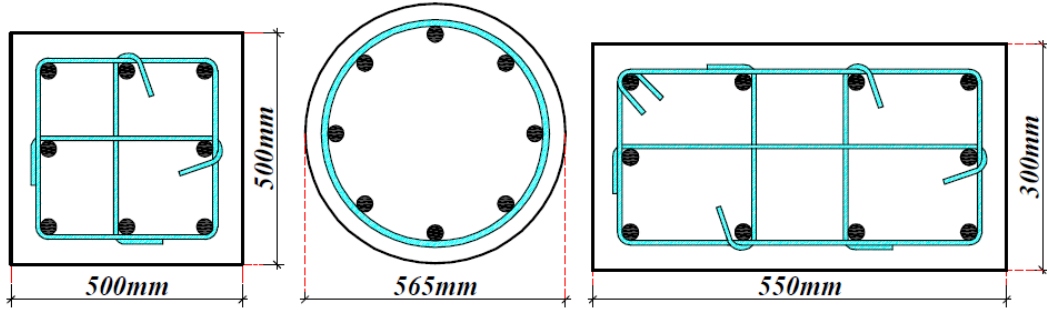
$$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (8)$$

Tasarlanan betonarme kolon modellerinde yapılan performans değerlendirmesinde; GÖ, KH ve SH için oluşan şekil değiştirme ve iç kuvvet sınır değerleri, farklı sargı donatı çapı, sargı donatı aralığı ve boyuna donatı çapına göre hesaplanan beton ve donatı çeliği

birim şekil değiştirmeleri, farklı eksenel yük seviyelerinde plastik mafsallı akma dönmesi ve plastik dönmeler hesaplanarak kolon kesitlerinin performans düzeyleri araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Kare en-kesitli kolonlarda farklı performans düzeyi için oluşan şekil değiştirme ve iç kuvvet sınır değerleri hesaplanarak Çizelgeler ve grafikler halinde özetlenmiştir. Tasarlanan betonarme kolon modellerinde moment-eğrilik analizlerinden ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u ve μ değerleri hesaplanmıştır. Moment-eğrilik ilişkileri ise malzemelerin doğrusal olmayan davranışları dikkate alınarak farklı parametreler için SAP2000 programı ile elde edilmiştir. Betonarme kolon kesitin üç farklı malzeme modelinden oluştuğu düşünülmüştür. SAP2000 programı ile yapılan moment-eğrilik analizlerinde, kabuk betonu için Mander sargısız beton modeli, çekirdek betonu için Mander sargılı beton modeli (Mander vd., 1988) ve donatı çeliği için Çizelge (4)'te verilen pekleşmeli model kullanılmıştır. Analiz sonuçlarından elde edilen moment-eğrilik grafiklerinden farklı modeller ve parametreler için elde edilen sınır değerler (ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u) çizelgeler halinde özetlenmiştir. Eğrilik sünekliği ise moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen ϕ_y ve ϕ_u değerlerinden faydalanarak Denklem (8)'den hesaplanmıştır. Yönetmelikte verilen hasar sınırlarını tanımlayan birim şekil değiştirme değerleri kare, dikdörtgen ve dairesel en-kesitli betonarme kolon modelleri için hesaplanmıştır. Şekil değiştirme sınırlarının hesaplanmasında TBDY (2018)'de tanımlanmış üç farklı hasar sınırı olan GÖ, KH ve SH seviyeleri kullanılmıştır. Birim şekil değiştirme istemlerinin belirlenmesi plastik şekil değiştirmelerin meydana geldiği betonarme sünek taşıyıcı sistem elemanlarında, farklı kesit hasar sınırlarına (GÖ, KH ve SH performans düzeyleri) göre izin verilen beton ve donatı çeliği şekil değiştirme üst sınırları (kapasiteleri) hesaplanmıştır. Beton ve donatı çeliği şekil değiştirme değerleri Çizelge (1)'de verilen denklemlerden hesaplanmıştır. Yığılı plastik davranışına göre modellenen betonarme kolonların moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen ϕ_y ve ϕ_u değerlerine göre plastik mafsallı dönme değerleri hesaplanmıştır. Plastik mafsallı dönmeleri Çizelge (2)'de verilen denklemlere göre hesaplanmıştır. Beton ve donatı çeliği için hesaplarda ve malzeme modellerinde kullanılan parametreler Çizelge (4)'te özetlenmiştir. Kesitlerde kullanılan donatı çapları ve donatı oranları TS500 (2000) ve TBDY (2018)'de verilen sınırlamalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Beton sınıfı olarak C30 seçilmiştir. Tüm kesit modelleri için, donatı çeliği olarak S420 seçilmiştir.



Şekil 1. Hesaplarda kullanılan betonarme kolon modellerinin kesit görünüşü

Çizelge 3. Tasarlanan betonarme kolon modellerine ait kesit özellikleri

Kare Kolon		Dairesel Kolon		Dikdörtgen Kolon		Boyuna Donatı	Etriye (mm)		Eksenel Yük (N/N _{max})	
No	b(mm)	h(mm)	No	D(mm)	No		b(mm)	h(mm)		Çap
S1			CR1		REC1	Φ20				
S2			CR2		REC2	Φ22			0.10	
S3	500	500	CR3	565	REC3	Φ24	300	550	Φ8 50	0.20
S4			CR4		REC4	Φ26			Φ10 75	0.30
S5			CR5		REC5	Φ28			Φ12 100	0.40
S6			CR6		REC6	Φ30				

Çizelge 4. Malzeme modellerinde kullanılan parametreler (TBDY, 2018)

Malzeme	Parametre	Değer
Beton Sınıfı: C30	Sargısız betonun maksimum gerilmeye ulaştığı birim şekil değiştirme değeri (ϵ_{co})	0.0020
	Sargısız betonun nihai birim şekil değiştirmesi (ϵ_{cu})	0.0035
	Karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck})	30MPa
Donatı Çeliği: S420	Donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirmesi (ϵ_{sy})	0.0021
	Donatı çeliğinin pekleşme birim şekil değiştirmesi (ϵ_{sp})	0.008
	Donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirmesi (ϵ_{su})	0.10
	Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı (f_{yk})	420MPa
	Donatı çeliğinin karakteristik kopma dayanımı (f_{su})	550MPa

3. Araştırma Bulguları

3.1. Kare En-Kesitli Kolon Modelleri

Kare en-kesitli betonarme kolon modelleri için farklı boyuna donatı çapı, sargı donatı çapı, sargı donatı aralığı ve eksenel yük seviyelerine göre moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak kolon modelleri için ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u ve μ değerleri hesaplanmıştır. Yığılı plastik davranışına göre modellenen kare en-kesitli betonarme kolonların farklı parametrelere göre akma durumu için θ_y değerleri Denklem (6) ile hesaplanmıştır. Kare en-kesitli betonarme kolon modelleri için elde edilen sonuçlar sırasıyla Çizelge (5, 6 ve 7)'de özetlenmiştir.

Çizelge 5. Kare en-kesitli kolonun farklı sargı donatı aralığına göre hesaplanan M_y , ϕ_y , M_u , ϕ_u , μ ve θ_y değerleri

Kesit	Boyuna donatı	Sargı donatı	N/N _{max}	M_y	ϕ_y	M_u	ϕ_u	μ	θ_y
S1	$\Phi 20$	$\Phi 8/50\text{mm}$	0.10	322.9	0.0073	405.9	0.2417	33.11	0.00737
			0.20	433.1	0.0084	486.8	0.2038	24.26	0.00814
			0.30	520.4	0.0097	544.9	0.1489	15.35	0.00906
			0.40	578.2	0.0114	584.7	0.1257	11.03	0.01025
		$\Phi 8/75\text{mm}$	0.10	324.3	0.0072	396.3	0.2043	28.38	0.00730
			0.20	431.1	0.0084	480.6	0.1466	17.45	0.00814
			0.30	518.3	0.0097	536.7	0.1082	11.15	0.00906
			0.40	569.4	0.0116	571.9	0.0945	8.15	0.01039
		$\Phi 8/100\text{mm}$	0.10	324.4	0.0072	387.5	0.1887	26.21	0.00730
			0.20	431.6	0.0084	478.1	0.1190	14.17	0.00814
			0.30	516.5	0.0097	531.7	0.0905	9.33	0.00906
			0.40	563.1	0.0118	564.3	0.0776	6.58	0.01053

Çizelge 6. Kare en-kesitli kolonun farklı sargı donatı çapına göre hesaplanan M_y , ϕ_y , M_u , ϕ_u , μ ve θ_y değerleri

Kesit	Boyuna donatı	Sargı donatı	N/N _{max}	M_y	ϕ_y	M_u	ϕ_u	μ	θ_y
S1	$\Phi 20$	$\Phi 10/50\text{mm}$	0.10	323.6	0.0073	410.0	0.2579	35.33	0.00737
			0.20	433.6	0.0084	508.5	0.2330	27.74	0.00814
			0.30	524.8	0.0096	570.0	0.2179	22.70	0.00899
			0.40	587.8	0.0112	601.9	0.1716	15.32	0.01011
		$\Phi 12/50\text{mm}$	0.10	322.4	0.0074	411.2	0.2950	39.86	0.00744
			0.20	434.6	0.0085	518.8	0.2845	33.47	0.00821
			0.30	525.8	0.0096	596.2	0.2488	25.92	0.00899
			0.40	596.7	0.0111	643.3	0.2391	21.54	0.01004

Çizelge 7. Kare en-kesitli kolonların farklı boyuna donatı çapına göre hesaplanan M_y , ϕ_y , M_u , ϕ_u , μ ve θ_y değerleri

Kesit	Boyuna donatı	Sargı donatı	N/N _{max}	M_y	ϕ_y	M_u	ϕ_u	μ	θ_y
S2	8 $\Phi 22$	$\Phi 10/50\text{mm}$	0.10	356.8	0.0075	462.4	0.2617	34.89	0.00766
			0.20	466.3	0.0086	556.6	0.2360	27.44	0.00846
			0.30	556	0.0097	613.5	0.2126	21.92	0.00925
			0.40	618.6	0.0113	641.2	0.1685	14.91	0.01041
S3	8 $\Phi 24$	$\Phi 10/50\text{mm}$	0.10	392.3	0.0076	518.9	0.2633	34.64	0.00789
			0.20	502.0	0.0088	607.5	0.240	27.27	0.00878
			0.30	591.8	0.0098	660.3	0.2072	21.14	0.00952
			0.40	654.4	0.0113	683.3	0.1668	14.76	0.01064
S4	8 $\Phi 26$	$\Phi 10/50\text{mm}$	0.10	431.4	0.0077	579.2	0.2649	34.40	0.00812
			0.20	540.2	0.0090	661.7	0.245	27.22	0.00911
			0.30	629.5	0.0099	710.2	0.2019	20.39	0.00980
			0.40	691.3	0.0114	728.1	0.1659	14.55	0.01094
S5	8 $\Phi 28$	$\Phi 10/50\text{mm}$	0.10	474.7	0.0078	643.5	0.2665	34.17	0.00835
			0.20	580.7	0.0095	719.1	0.2570	27.05	0.00968
			0.30	668.1	0.0099	763.2	0.1965	19.85	0.01000
			0.40	730.5	0.0114	775.5	0.1649	14.46	0.01117
S6	8 $\Phi 30$	$\Phi 10/50\text{mm}$	0.10	519.0	0.00795	710.7	0.2708	34.06	0.00863
			0.20	623.6	0.0097	779.4	0.2605	26.86	0.01004
			0.30	710.6	0.010	819.3	0.1912	19.12	0.01028
			0.40	773.3	0.0115	825.9	0.1642	14.28	0.01148

Kare kesitli kolonlar için farklı parametrelere göre farklı performans düzeyi için hesaplanan ε_c değerleri Çizelge (8, 11 ve 14)'te verilmiştir. Kare kesitli kolonlar için farklı parametrelere göre farklı performans düzeyi için hesaplanan ε_s değerleri Çizelge (9, 12 ve 15)'te verilmiştir. Kare kesitli kolonların farklı parametreler için farklı eksenel yük seviyelerinde farklı performans düzeyine göre hesaplanan θ_p değerleri Çizelge (10, 13 ve 16)'da verilmiştir. Kare en-kesitli kolonunun farklı sargı donatı aralığına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri Şekil (2)'de, farklı sargı donatı çapına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri Şekil (3)'te ve farklı boyuna donatı çapına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri Şekil (4)'te verilmiştir.

Çizelge 8. Kare en-kesitli kolonun farklı sargı donatı aralığına göre hesaplanan beton birim şekil değiştirme değerleri

No	Boyuna donatı	Sargı donatısı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
S1	8Φ20	Φ8/50mm	ε_c	0.0129	0.0097	0.0025
		Φ8/75mm		0.0110	0.0082	
		Φ8/100mm		0.0098	0.0073	

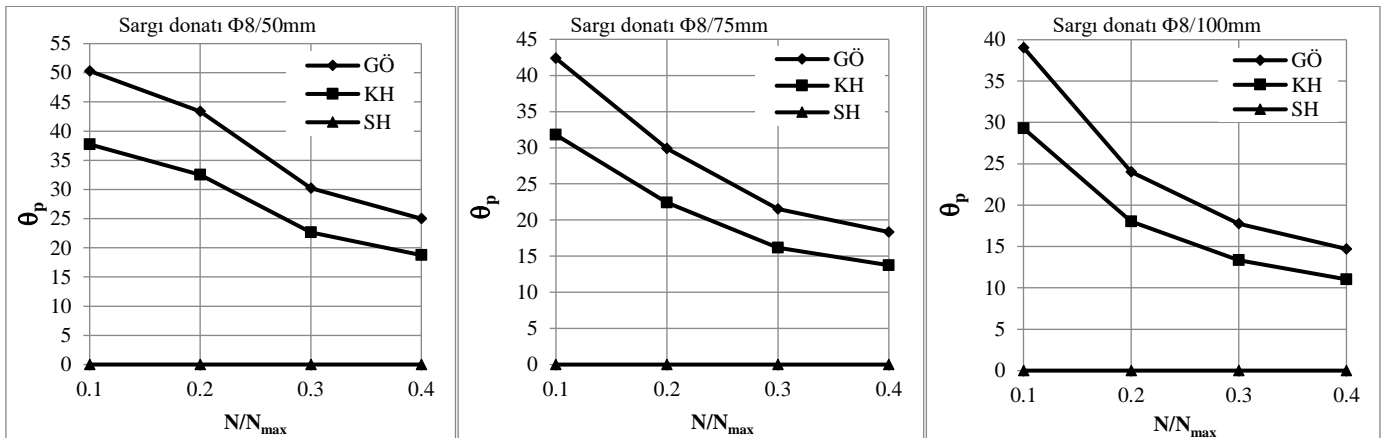
Çizelge 9. Kare en-kesitli kolonun farklı sargı donatı aralığına göre hesaplanan donatı çeliği birim şekil değiştirme değerleri

No	Boyuna donatı	Sargı donatısı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
S1	8Φ20	Φ8/50mm	ε_s	0.0320	0.0240	0.0075
		Φ8/75mm				
		Φ8/100mm				

Betonarme kolon kesitlerinde oluşan mafsallardaki θ_p değerleri farklı sargı donatı aralığı ve eksenel yük seviyelerine göre GÖ, KH ve SH performans düzeyleri için hesaplanmıştır.

Çizelge 10. Kare en-kesitli kolonun farklı sargı donatı aralığına göre hesaplanan plastik dönme değerleri

No	Boyuna donatı	Eksenel Yük N/N_{max}	Sargı donatısı	Plastik dönmeler θ_p	Performans düzeyi		
					GÖ	KH	SH
S1	8Φ20	0.10	Φ8/50mm	θ_p	50.31	37.73	0
					43.36	32.52	
					30.20	22.65	
					25.00	18.75	
		0.20	Φ8/75mm	θ_p	42.37	31.78	
					29.91	22.43	
					21.54	16.16	
					18.34	13.75	
		0.30	Φ8/100mm	θ_p	39.05	29.29	
					24.04	18.03	
					17.77	13.33	
					14.71	11.03	
0.40							



Şekil 2. Kare en-kesitli kolonunun farklı sargı donatı aralığına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri

Çizelge 11. Kare en-kesitli kolonun farklı sargı donatı çapına göre hesaplanan beton birim şekil değiştirme değerleri

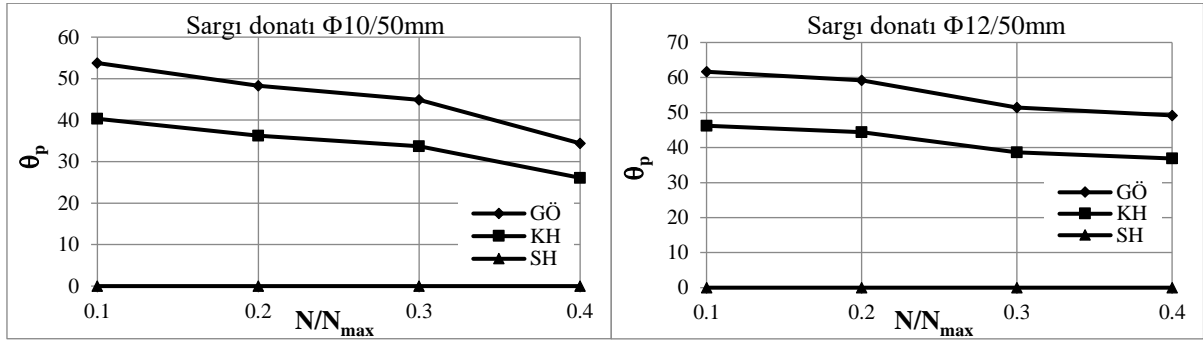
No	Boyuna donatı	Sargı donatısı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
S1	8Φ20	Φ10/50mm	ϵ_c	0.0153	0.0115	0.0025
		Φ12/50mm		0.0178	0.0133	0.0025

Çizelge 12. Kare en-kesitli kolonun farklı sargı donatı çapına göre hesaplanan donatı çeliği birim şekil değiştirme değerleri

No	Boyuna donatı	Sargı donatısı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
S1	8Φ20	Φ10/50mm	ϵ_s	0.0320	0.0240	0.0075
		Φ12/50mm				

Çizelge 13. Kare en-kesitli kolonun farklı sargı donatı çapına göre hesaplanan plastik dönme değerleri

No	Boyuna donatı	Eksenel Yük N/N_{max}	Sargı donatısı	Plastik dönmeler	Performans düzeyi		
					GÖ	KH	SH
S1	8Φ20	0.10	Φ10/50mm	θ_p	53.76	40.32	0
		0.20			48.29	36.22	
		0.30			44.90	33.67	
		0.40			34.40	26.10	
		0.10	Φ12/50mm	θ_p	61.64	46.23	0
		0.20			59.24	44.43	
		0.30			51.47	38.60	
		0.40			49.18	36.88	

**Şekil 3.** Kare en-kesitli kolonun farklı sargı donatı çapına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri**Çizelge 14.** Kare en-kesitli kolonların farklı boyuna donatı çapına göre hesaplanan beton birim şekil değiştirme değerleri

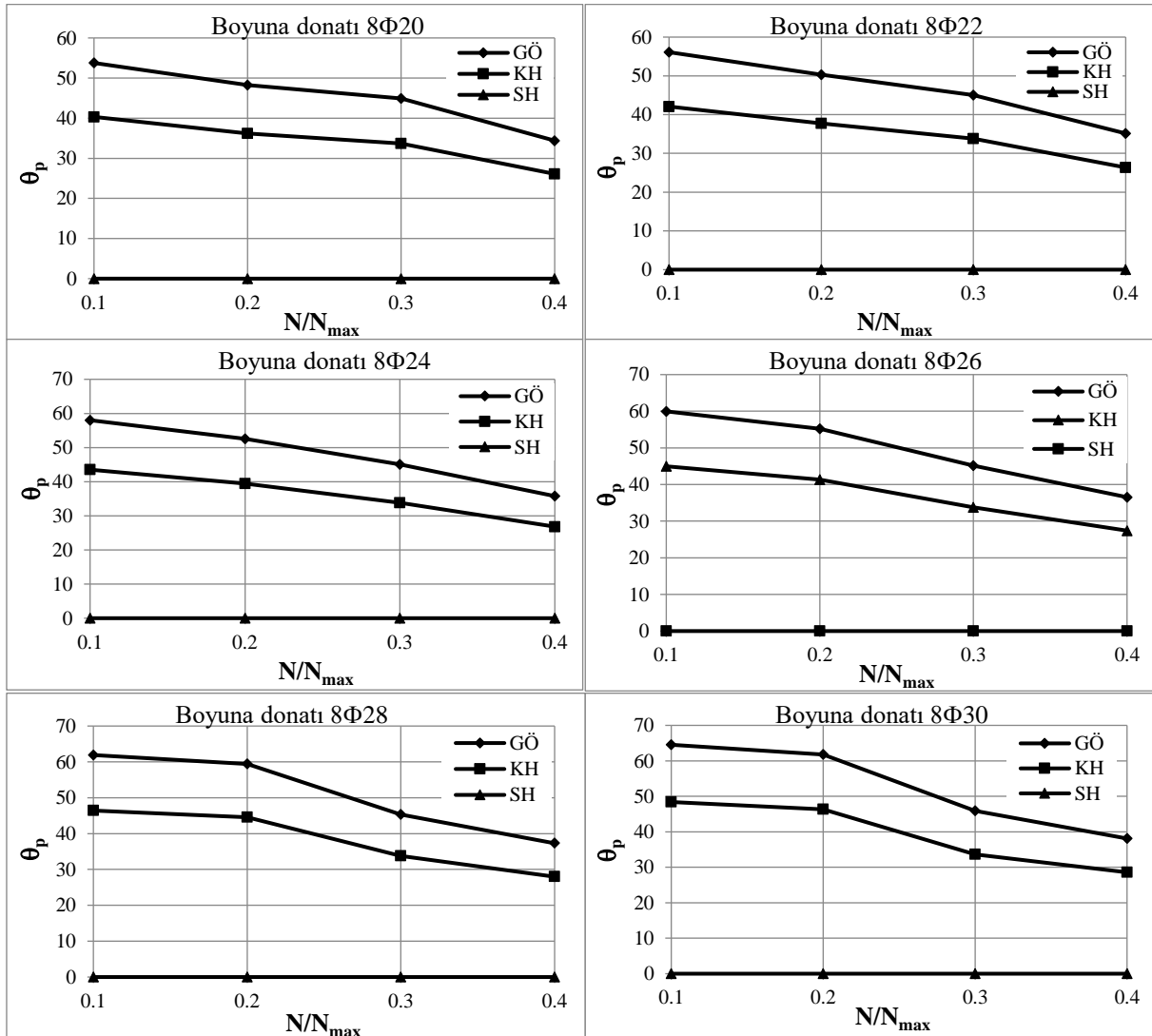
No	Boyuna donatı	Sargı donatısı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
S1	8Φ20	Φ10/50mm	ϵ_c	0.01533	0.01150	0.0025
S2	8Φ22			0.01535	0.01152	0.0025
S3	8Φ24			0.01538	0.01153	0.0025
S4	8Φ26			0.01540	0.01155	0.0025
S5	8Φ28			0.01542	0.01157	0.0025
S6	8Φ30			0.01545	0.01159	0.0025

Çizelge 15. Kare en-kesitli kolonların farklı boyuna donatı çapına göre hesaplanan donatı çeliği birim şekil değiştirme değerleri

No	Boyuna donatı	Sargı donatısı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
S1	8Φ20	Φ10/50mm	ϵ_s	0.0320	0.0240	0.0075
S2	8Φ22					
S3	8Φ24					
S4	8Φ26					
S5	8Φ28					
S6	8Φ30					

Çizelge 16. Kare en-kesitli kolonların farklı boyuna donatı çapına göre hesaplanan plastik dönme değerleri

No	Boyuna donatı	Sargı donatı aralığı	Eksenel Yük N/N_{max}	Plastik dönmeler θ_p	Performans düzeyi		
					GÖ	KH	SH
S2	8 Φ 22	Φ 10/50mm	0.10	θ_p	56.11	42.08	0
			0.20		50.32	37.74	
			0.30		45.03	33.77	
			0.40		35.14	26.35	
S3	8 Φ 24	Φ 10/50mm	0.10	θ_p	58.02	43.52	0
			0.20		52.60	39.45	
			0.30		45.08	33.81	
			0.40		35.77	26.82	
S4	8 Φ 26	Φ 10/50mm	0.10	θ_p	59.96	44.97	0
			0.20		55.17	41.37	
			0.30		45.18	33.81	
			0.40		36.54	27.41	
S5	8 Φ 28	Φ 10/50mm	0.10	θ_p	61.91	46.43	0
			0.20		59.40	44.55	
			0.30		45.31	33.76	
			0.40		37.30	27.98	
S6	8 Φ 30	Φ 10/50mm	0.10	θ_p	64.53	48.40	0
			0.20		61.76	46.32	
			0.30		45.89	33.67	
			0.40		38.11	28.58	

**Şekil 4.** Kare en-kesitli kolonlarının farklı boyuna donatı çapına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri

3.2. Dikdörtgen En-Kesitli Kolon Modelleri

Dikdörtgen en-kesitli betonarme kolon modelleri için farklı aksenal yük seviyelerine göre moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak kolon modelleri için ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u ve μ değerleri hesaplanmıştır. Yığılı plastik davranışına göre modellenen dikdörtgen en-kesitli betonarme kolonların farklı parametrelere göre akma durumu için θ_y değerleri hesaplanmıştır. Dikdörtgen en-kesitli betonarme kolon modelleri için elde edilen sonuçlar sırasıyla Çizelge (17, 18 ve 19)'da özetlenmiştir.

Çizelge 17. Dikdörtgen en-kesitli kolonunun farklı sargı donatı aralığına göre hesaplanan M_y , ϕ_y , M_u , ϕ_u , μ ve θ_y değerleri

Kesit	Boyuna donatı	Sargı donatı	N/N_{max}	M_y	ϕ_y	M_u	ϕ_u	μ	θ_y
REC1	10 Φ 20	Φ 8/50mm	0.10	318.60	0.0068	441.19	0.2527	37.16	0.00710
			0.20	394.35	0.0077	481.03	0.2086	27.09	0.00773
			0.30	457.10	0.0087	516.75	0.1891	21.74	0.00843
			0.40	499.43	0.010	531.97	0.1476	14.76	0.00934
		Φ 8/75mm	0.10	318.57	0.0068	420.14	0.1849	27.19	0.00710
			0.20	392.16	0.0077	457.05	0.1630	21.17	0.00773
			0.30	454.52	0.0088	489.57	0.1343	15.26	0.00850
			0.40	492.37	0.0102	504.55	0.1061	10.40	0.00948
		Φ 8/100mm	0.10	318.56	0.0068	405.72	0.1545	22.72	0.00710
			0.20	391.8	0.0077	444.41	0.1375	17.86	0.00773
			0.30	453.06	0.0088	482.88	0.1082	12.30	0.00850
			0.40	487.90	0.0103	496.15	0.0835	8.11	0.00955

Çizelge 18. Dikdörtgen en-kesitli kolonun farklı sargı donatı çapına göre hesaplanan M_y , ϕ_y , M_u , ϕ_u , μ ve θ_y değerleri

Kesit	Boyuna donatı	Sargı donatı	N/N_{max}	M_y	ϕ_y	M_u	ϕ_u	μ	θ_y
REC1	10 Φ 20	Φ 10/50mm	0.10	320.83	0.0069	449.57	0.2881	41.75	0.00717
			0.20	393.89	0.0078	506.18	0.2751	35.27	0.00780
			0.30	458.70	0.0087	542.40	0.2595	29.83	0.00843
			0.40	506.14	0.0099	572.30	0.2171	21.93	0.00927
		Φ 12/50mm	0.10	322.77	0.0069	453.21	0.3095	44.86	0.00717
			0.20	393.45	0.0078	516.50	0.2995	38.40	0.00780
			0.30	459.21	0.0087	583.10	0.2703	31.07	0.00843
			0.40	510.72	0.0090	597.30	0.2445	27.17	0.00864

Çizelge 19. Dikdörtgen en-kesitli kolonun farklı boyuna donatı çapına göre hesaplanan M_y , ϕ_y , M_u , ϕ_u , μ ve θ_y değerleri

Kesit	Boyuna donatı	Sargı donatı	N/N_{max}	M_y	ϕ_y	M_u	ϕ_u	μ	θ_y
REC2	10 Φ 22	Φ 10/50mm	0.10	361.4	0.0070	513.8	0.2828	40.40	0.00738
			0.20	434.8	0.0079	562.6	0.2749	34.80	0.00803
			0.30	497.2	0.0087	598.2	0.2573	29.57	0.00861
			0.40	544.5	0.0099	626.4	0.2151	21.73	0.00947
REC3	10 Φ 24	Φ 10/50mm	0.10	404.2	0.0071	582.1	0.2781	39.17	0.00759
			0.20	477.2	0.008	623.7	0.2722	34.03	0.00826
			0.30	541.4	0.0088	658.8	0.2555	29.03	0.00886
			0.40	588.1	0.0099	685.1	0.2130	21.52	0.00967
REC4	10 Φ 26	Φ 10/50mm	0.10	451.5	0.0072	654.4	0.2752	38.22	0.00781
			0.20	520.4	0.0081	689.6	0.2669	32.95	0.00850
			0.30	586.9	0.0089	724.3	0.2539	28.53	0.00911
			0.40	631.6	0.010	748.2	0.2108	21.08	0.00995
REC5	10 Φ 28	Φ 10/50mm	0.10	500.0	0.0074	725.2	0.2730	36.89	0.00812
			0.20	574.3	0.0082	760.2	0.2630	32.07	0.00874
			0.30	634.2	0.0090	794.5	0.2525	28.06	0.00937
			0.40	679.4	0.010	815.7	0.2087	20.87	0.01015
REC6	10 Φ 30	Φ 10/50mm	0.10	556.2	0.0075	800.7	0.2701	36.01	0.00834
			0.20	622.3	0.0083	835.3	0.2604	31.37	0.00899
			0.30	686.7	0.0090	867.3	0.2511	27.90	0.00955
			0.40	732.6	0.010	887.5	0.2066	20.66	0.01035

Dikdörtgen kesitli kolon için farklı parametrelere göre farklı performans düzeyi için hesaplanan ϵ_c değerleri Çizelge (20, 23 ve 26)'da verilmiştir. Dikdörtgen kesitli kolon için farklı parametrelere göre farklı performans düzeyi için hesaplanan ϵ_s değerleri

Çizelge (21, 24 ve 27)'de verilmiştir. Dikdörtgen kesitli kolonların farklı parametreler için farklı eksenel yük seviyelerde farklı performans düzeyine göre hesaplanan θ_p değerleri Çizelge (22, 25 ve 28)'de verilmiştir. Dikdörtgen en-kesitli kolonunun farklı sargı donatı aralığına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri Şekil (5)'te, farklı sargı donatı çapına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri Şekil (6)'da ve farklı boyuna donatı çapına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri Şekil (7)'de verilmiştir.

Çizelge 20. Dikdörtgen en-kesitli kolonun farklı sargı donatı aralığına göre hesaplanan beton birim şekil değiştirme değerleri

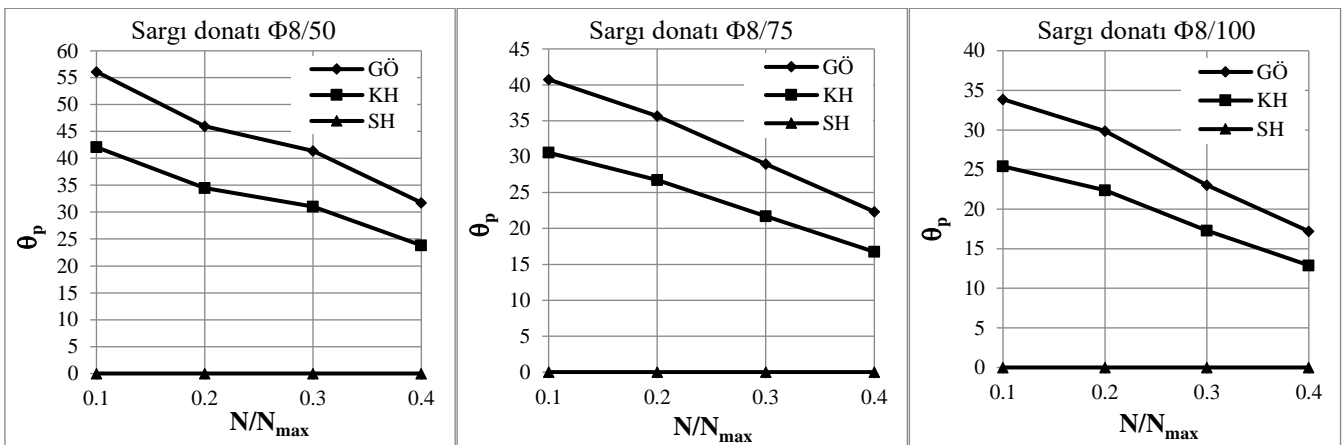
No	Boyuna donatı	Sargı donatı aralığı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
REC1	10 Φ 20	Φ 8/50mm	ϵ_c	0.0138	0.0103	
		Φ 8/75mm		0.0115	0.0087	0.0025
		Φ 8/100mm		0.0102	0.0076	

Çizelge 21. Dikdörtgen en-kesitli kolonun farklı sargı donatı aralığına göre hesaplanan donatı çeliği birim şekil değiştirme değerleri

No	Boyuna donatı	Sargı donatı aralığı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
REC1	10 Φ 20	Φ 8/50mm	ϵ_s	0.0320	0.0240	0.0075
		Φ 8/75mm				
		Φ 8/100mm				

Çizelge 22. Dikdörtgen en-kesitli kolonun farklı sargı donatı aralığına göre hesaplanan plastik dönme değerleri

No	Boyuna donatı	Eksenel Yük N/N_{max}	Sargı donatı aralığı	Plastik dönmeler	Performans düzeyi		
					GÖ	KH	SH
REC1	8 Φ 20	0.10	Φ 8/50mm	θ_p	56.11	42.08	0
		0.20			45.97	34.48	
		0.30			41.39	31.04	
		0.40			31.77	23.83	
	8 Φ 20	0.10	Φ 8/75mm	θ_p	40.75	30.56	0
		0.20			35.64	26.73	
		0.30			28.96	21.72	
		0.40			22.34	16.75	
8 Φ 20	0.10	Φ 8/100mm	θ_p	33.87	25.40	0	
	0.20			29.87	22.40		
	0.30			23.04	17.28		
	0.40			17.20	12.90		



Şekil 5. Dikdörtgen en-kesitli kolonunun farklı sargı donatı aralığına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri

Çizelge 23. Dikdörtgen en-kesitli kolonun farklı sargı donatı çapına göre hesaplanan beton birim şekil değiştirme değerleri

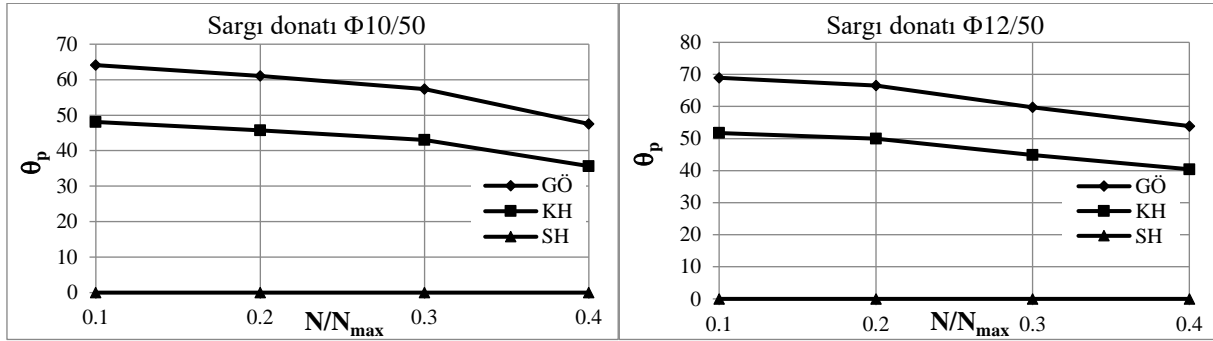
No	Boyuna donatı	Sargı donatı aralığı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
REC1	8Φ20	Φ10/50mm	ε_c	0.0164	0.0123	0.0025
		Φ12/50mm		0.0180	0.0135	

Çizelge 24. Dikdörtgen kolonun farklı sargı donatı çapına göre hesaplanan donatı çeliği birim şekil değiştirme değerleri

No	Boyuna donatı	Sargı donatı aralığı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
REC1	8Φ20	Φ10/50mm Φ12/50mm	ε_s	0.0320	0.0240	0.0075

Çizelge 25. Dikdörtgen en-kesitli kolonun farklı sargı donatı çapına göre hesaplanan plastik dönme değerleri

No	Boyuna donatı	Eksenel Yük N/N_{max}	Sargı donatı aralığı	Plastik dönmeler θ_p	Performans düzeyi		
					GÖ	KH	SH
REC1	8Φ20	0.10	Φ10/50mm	θ_p	64.11	48.09	0
		0.20			61.02	45.76	
		0.30			57.34	43.0	
		0.40			47.53	35.65	
		0.10	Φ12/50mm	θ_p	68.96	51.72	0
		0.20			66.55	49.91	
		0.30			59.78	44.84	
		0.40			53.89	40.42	

**Şekil 6.** Dikdörtgen en-kesitli kolonunun farklı sargı donatı çapına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri**Çizelge 26.** Dikdörtgen en-kesitli kolonun farklı boyuna donatı çapına göre hesaplanan beton birim şekil değiştirme değerleri

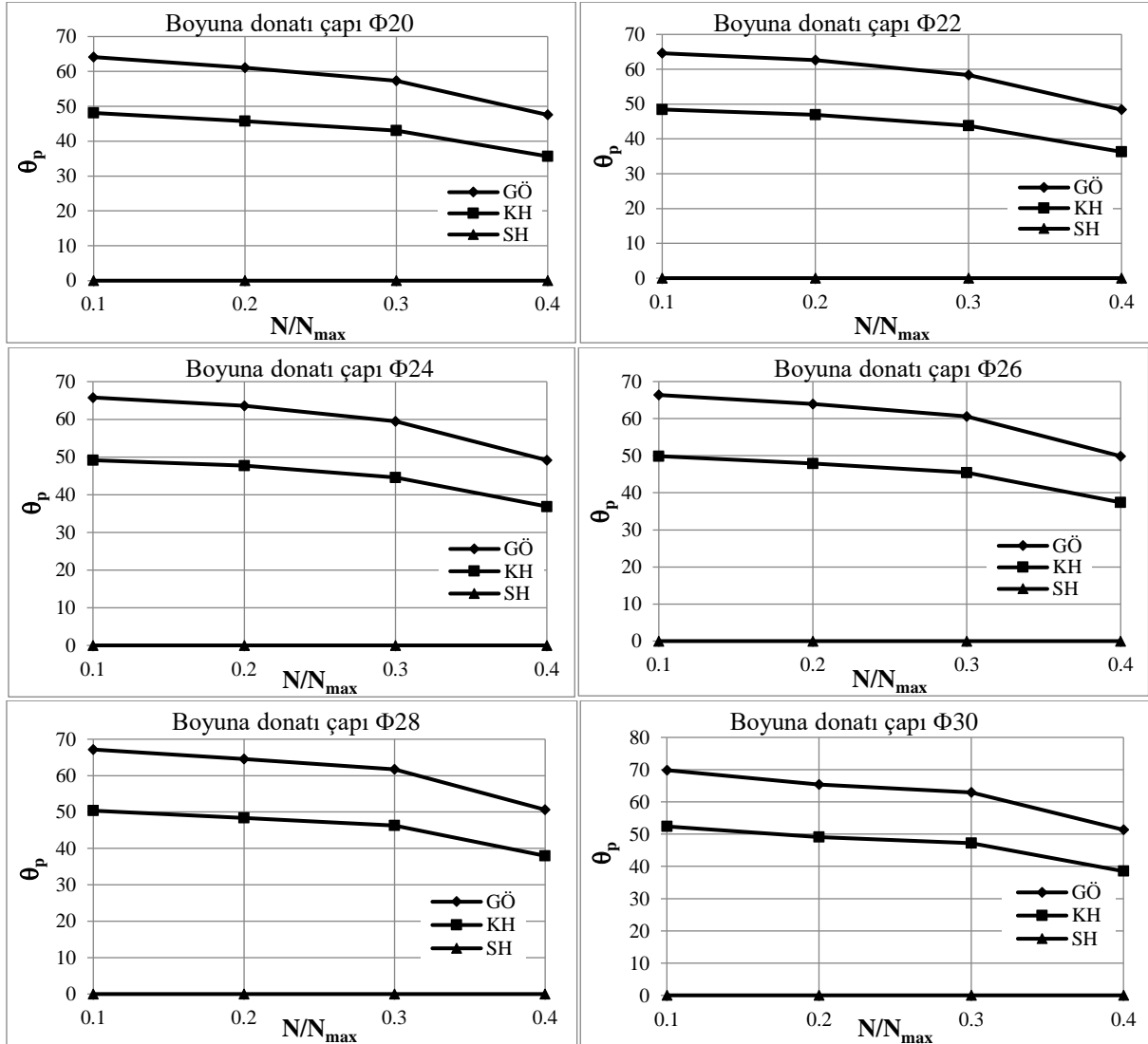
No	Boyuna donatı	Sargı donatı aralığı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
REC1	8Φ20	Φ10/50mm	ε_c	0.01639	0.01230	0.0025
REC2	8Φ22			0.01642	0.01231	
REC3	8Φ24			0.01644	0.01233	
REC4	8Φ26			0.01647	0.01235	
REC5	8Φ28			0.01649	0.01237	
REC6	8Φ30			0.01652	0.01239	

Çizelge 27. Dikdörtgen en-kesitli kolonun farklı boyuna donatı çapına göre hesaplanan beton birim şekil değiştirme değerleri

No	Boyuna donatı	Sargı donatı aralığı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
REC1	8Φ20	Φ10/50mm	ε_s	0.0320	0.0240	0.0075
REC2	8Φ22					
REC3	8Φ24					
REC4	8Φ26					
REC5	8Φ28					
REC6	8Φ30					

Çizelge 28. Dikdörtgen en-kesitli kolonun farklı boyuna donatı çapına göre hesaplanan plastik dönme değerleri

No	Boyuna donatı	Sargı donatı aralığı	Eksenel Yük N/N_{max}	Plastik dönmeler	Performans düzeyi		
					GÖ	KH	SH
REC2	8Φ22	Φ10/50mm	0.10	θ_p	64.59	48.44	0
			0.20		62.61	46.95	
			0.30		58.38	43.79	
			0.40		48.37	36.28	
REC3	8Φ24	Φ10/50mm	0.10	θ_p	65.15	48.86	0
			0.20		63.60	47.70	
			0.30		59.48	44.61	
			0.40		49.16	36.87	
REC4	8Φ26	Φ10/50mm	0.10	θ_p	66.10	49.57	0
			0.20		63.92	47.94	
			0.30		60.60	45.45	
			0.40		49.88	37.41	
REC5	8Φ28	Φ10/50mm	0.10	θ_p	67.16	50.37	0
			0.20		64.52	48.39	
			0.30		61.76	46.32	
			0.40		50.62	37.96	
REC6	8Φ30	Φ10/50mm	0.10	θ_p	68.04	51.03	0
			0.20		65.42	49.06	
			0.30		62.92	47.19	
			0.40		51.33	38.50	

**Şekil 7.** Dikdörtgen en-kesitli kolonların farklı boyuna donatı çapına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri

3.3 Dairesel en-kesitli kolon modelleri

Dairesel en-kesitli betonarme kolon modelleri için farklı eksenel yük seviyelerine göre moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak kolon modelleri için ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u ve μ değerleri hesaplanmıştır. Yığılı plastik davranışına göre modellenen dairesele en-kesitli betonarme kolonların farklı parametrelere göre akma durumu için θ_y değerleri hesaplanmıştır. Dairesel en-kesitli betonarme kolon modelleri için elde edilen sonuçlar sırasıyla Çizelge (29, 30 ve 31)'de özetlenmiştir.

Çizelge 29. Dairesel en-kesitli kolonun farklı sargı donatı aralığına göre hesaplanan M_y , ϕ_y , M_u , ϕ_u , μ ve θ_y değerleri

Kesit	Boyuna donatı	Sargı donatı	N/N_{max}	M_y	ϕ_y	M_u	ϕ_u	μ	θ_y
CR1	8 Φ 20	Φ 8/50mm	0.10	297.40	0.0067	386.43	0.1478	22.06	0.00705
			0.20	395.48	0.0077	459.36	0.1061	13.78	0.00775
			0.30	472.07	0.0088	517.41	0.0834	9.48	0.00852
			0.40	524.63	0.0101	554.06	0.0723	7.16	0.00944
		Φ 8/75mm	0.10	297.20	0.0067	374.75	0.1145	17.09	0.00705
			0.20	393.57	0.0077	454.59	0.0813	10.56	0.00775
			0.30	469.53	0.0088	510.31	0.0642	7.30	0.00852
			0.40	518.41	0.0102	542.57	0.0562	5.51	0.00951
		Φ 8/100mm	0.10	296.60	0.0067	366.07	0.0971	14.49	0.00705
			0.20	393.36	0.0077	451.80	0.0681	8.84	0.00775
			0.30	467.62	0.0088	506.09	0.0547	6.22	0.00852
			0.40	514.57	0.0102	534.40	0.0472	4.63	0.00951

Çizelge 30. Dairesel en-kesitli kolonun farklı sargı donatı çapına göre hesaplanan M_y , ϕ_y , M_u , ϕ_u , μ ve θ_y değerleri

Kesit	Boyuna donatı	Sargı donatı	N/N_{max}	M_y	ϕ_y	M_u	ϕ_u	μ	θ_y
CR1	8 Φ 20	Φ 10/50mm	0.10	297.33	0.0067	395.56	0.2022	30.18	0.00705
			0.20	397.43	0.0077	479.57	0.1456	18.91	0.00775
			0.30	476.57	0.0088	534.15	0.1160	13.18	0.00852
			0.40	531.69	0.010	565.71	0.0971	9.71	0.00937
		Φ 12/50mm	0.10	297.75	0.0068	401.26	0.2463	36.22	0.00712
			0.20	398.53	0.0078	494.8	0.1916	24.56	0.00782
			0.30	480.35	0.0088	560.17	0.1530	17.39	0.00852
			0.40	539.50	0.010	601.15	0.1280	12.80	0.00937

Çizelge 31. Dairesel en-kesitli kolonunun farklı boyuna donatı çapına göre hesaplanan M_y , ϕ_y , M_u , ϕ_u , μ ve θ_y değerleri

Kesit	Boyuna donatı	Sargı donatı	N/N_{max}	M_y	ϕ_y	M_u	ϕ_u	μ	θ_y
CR2	8 Φ 22	Φ 10/50mm	0.10	324.1	0.0068	442.3	0.1925	28.31	0.00726
			0.20	422.6	0.0078	521.2	0.1417	18.17	0.00798
			0.30	501.4	0.0088	571.8	0.1138	12.93	0.00870
			0.40	556.9	0.010	598.0	0.0964	9.64	0.00957
CR3	8 Φ 24	Φ 10/50mm	0.10	353.4	0.0069	492.3	0.1824	26.43	0.00747
			0.20	450.1	0.0079	565.9	0.1373	17.38	0.00821
			0.30	528.9	0.0089	612.3	0.1112	12.49	0.00895
			0.40	584.5	0.010	634.7	0.0954	9.54	0.00977
CR4	8 Φ 26	Φ 10/50mm	0.10	385.6	0.0070	545.5	0.1736	24.80	0.00768
			0.20	479.8	0.0079	613.4	0.1334	16.89	0.00837
			0.30	559.2	0.0089	655.6	0.1089	12.24	0.00913
			0.40	614.6	0.010	674.0	0.0949	9.49	0.00997
CR5	8 Φ 28	Φ 10/50mm	0.10	418.2	0.0071	601.8	0.1654	23.30	0.00790
			0.20	511.8	0.0080	663.7	0.1297	16.21	0.00861
			0.30	590.3	0.0090	701.5	0.1066	11.84	0.00939
			0.40	646.6	0.010	716.2	0.0944	9.44	0.01017
CR6	8 Φ 30	Φ 10/50mm	0.10	453.4	0.0072	661.1	0.1579	21.93	0.00813
			0.20	545.8	0.0081	716.2	0.1261	15.57	0.00885
			0.30	623.8	0.0090	750.1	0.1043	11.59	0.00957
			0.40	680.2	0.010	761.1	0.0939	9.39	0.01037

Dairesel kesitli kolon için farklı parametrelere göre farklı performans düzeyi için hesaplanan ε_c değerleri Çizelge (32, 35 ve 38)'de verilmiştir. Dairesel kesitli kolon için farklı parametrelere göre farklı performans düzeyi için hesaplanan ε_s değerleri Çizelge (33, 36 ve 39)'da verilmiştir. Dairesel kesitli kolonların farklı parametreler için farklı eksenel yük seviyelerde farklı performans düzeyine göre hesaplanan θ_p değerleri Çizelge (34, 37 ve 40)'ta verilmiştir. Dairesel en-kesitli kolon için farklı sargı donatı aralığına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri Şekil (8)'de, farklı sargı donatı çapına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri Şekil (9)'da ve farklı boyuna donatı çapına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri Şekil (10)'da verilmiştir.

Çizelge 32. Dairesel en-kesitli kolonun farklı sargı donatı aralığına göre hesaplanan beton birim şekil değiştirme değerleri

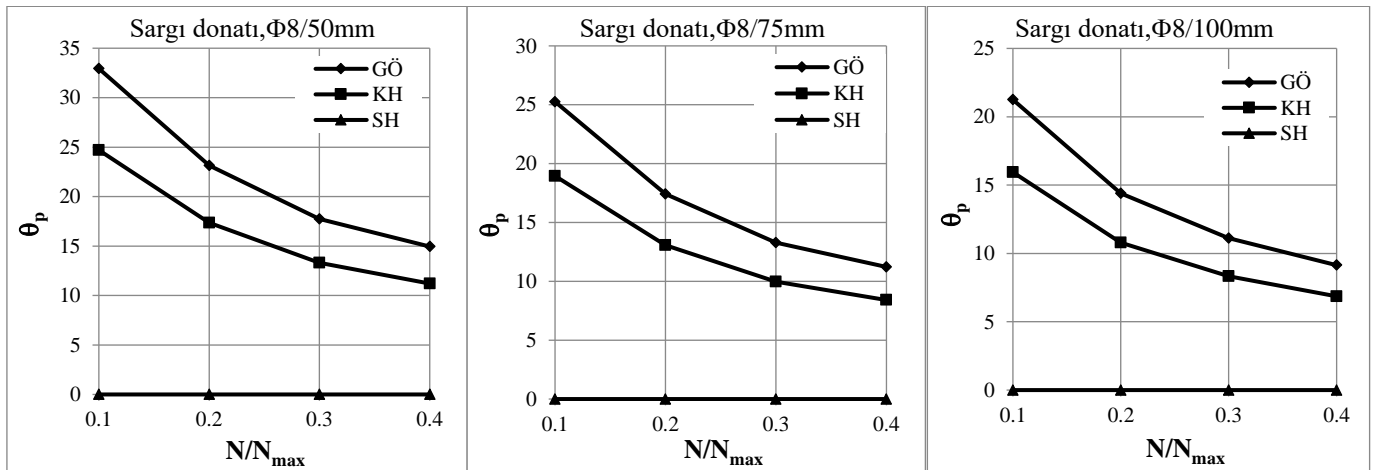
No	Boyuna donatı	Sargı donatı aralığı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
CR1	10Φ20	Φ8/50mm	ε_c	$0.0189 > \varepsilon_c^{(GÖ)}$	0.0141	
		Φ8/75mm		0.0160	0.0120	0.0025
		Φ8/100mm		0.0141	0.0106	

Çizelge 33. Dairesel en-kesitli kolonun farklı sargı donatı aralığına göre hesaplanan donatı çeliği birim şekil değiştirme değerleri

No	Boyuna donatı	Sargı donatı aralığı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
CR1	10Φ20	Φ8/50mm	ε_s	0.0320	0.0240	0.0075
		Φ8/75mm				
		Φ8/100mm				

Çizelge 34. Dairesel en-kesitli kolonun farklı sargı donatı aralığına göre hesaplanan plastik dönme değerleri

No	Boyuna donatı	Eksenel Yük N/N_{max}	Sargı donatı aralığı	Plastik dönmeler θ_p	Performans düzeyi		
					GÖ	KH	SH
CR1	8Φ20	0.10	Φ8/50mm	θ_p	32.94	24.70	
					23.15	17.36	0
					17.73	13.30	
					14.95	11.21	
		0.20	Φ8/75mm	θ_p	25.26	18.95	
					17.43	13.08	0
					13.30	9.98	
					11.22	8.41	
		0.30	Φ8/100mm	θ_p	21.25	15.94	
					14.39	10.79	
					11.11	8.33	0
					9.14	6.86	



Şekil 8. Dairesel en-kesitli kolonunun farklı sargı donatı aralığına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri

Çizelge 35. Dairesel en-kesitli kolon için farklı sargı donatı aralığına göre hesaplanan beton birim şekil değiştirme değerleri

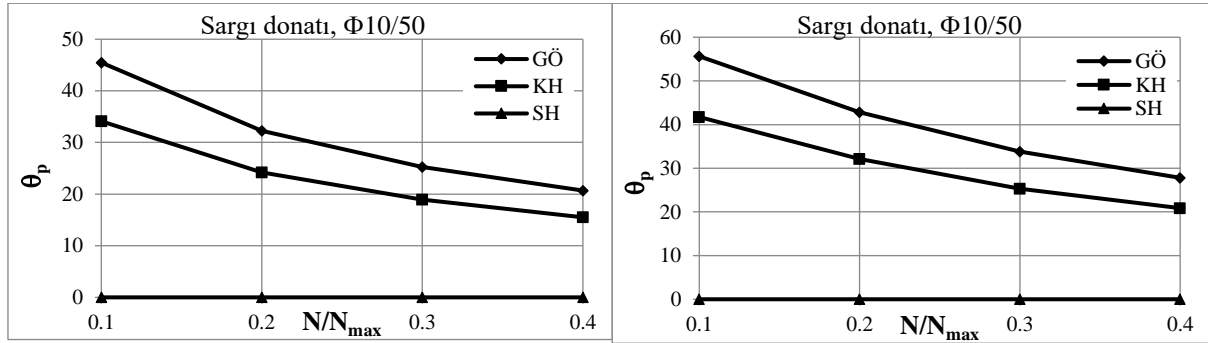
No	Boyuna donatı	Sargı donatı aralığı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
CR1	8Φ20	Φ10/50mm Φ12/50mm	ϵ_c	$0.0228 > \epsilon_c^{(GÖ)}$	0.0171	0.0025
				$0.0267 > \epsilon_c^{(GÖ)}$	0.020	

Çizelge 36. Dairesel en-kesitli kolonun farklı sargı donatı aralığına göre hesaplanan donatı çeliği birim şekil değiştirme değerleri

No	Boyuna donatı	Sargı donatı aralığı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
CR1	8Φ20	Φ10/50mm Φ12/50mm	ϵ_s	0.0320	0.0240	0.0075

Çizelge 37. Dairesel en-kesitli kolonun farklı sargı donatı çapına göre hesaplanan plastik dönme değerleri

No	Boyuna donatı	Eksenel Yük N/N_{max}	Sargı donatı aralığı	Plastik dönmeler	Performans düzeyi		
					GÖ	KH	SH
CR1	8Φ20	0.10	Φ10/50mm	θ_p	45.48	34.11	0
		0.20			32.26	24.20	
		0.30			25.25	18.94	
		0.40			20.69	15.51	
		0.10	Φ12/50mm	θ_p	55.64	41.73	0
		0.20			42.85	32.14	
		0.30			33.78	25.34	
		0.40			27.81	20.86	

**Şekil 9.** Dairesel en-kesitli kolonların farklı sargı donatı çapına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri**Çizelge 38.** Dairesel en-kesitli kolonunun farklı boyuna donatı aralığına göre hesaplanan beton birim şekil değiştirme değerleri

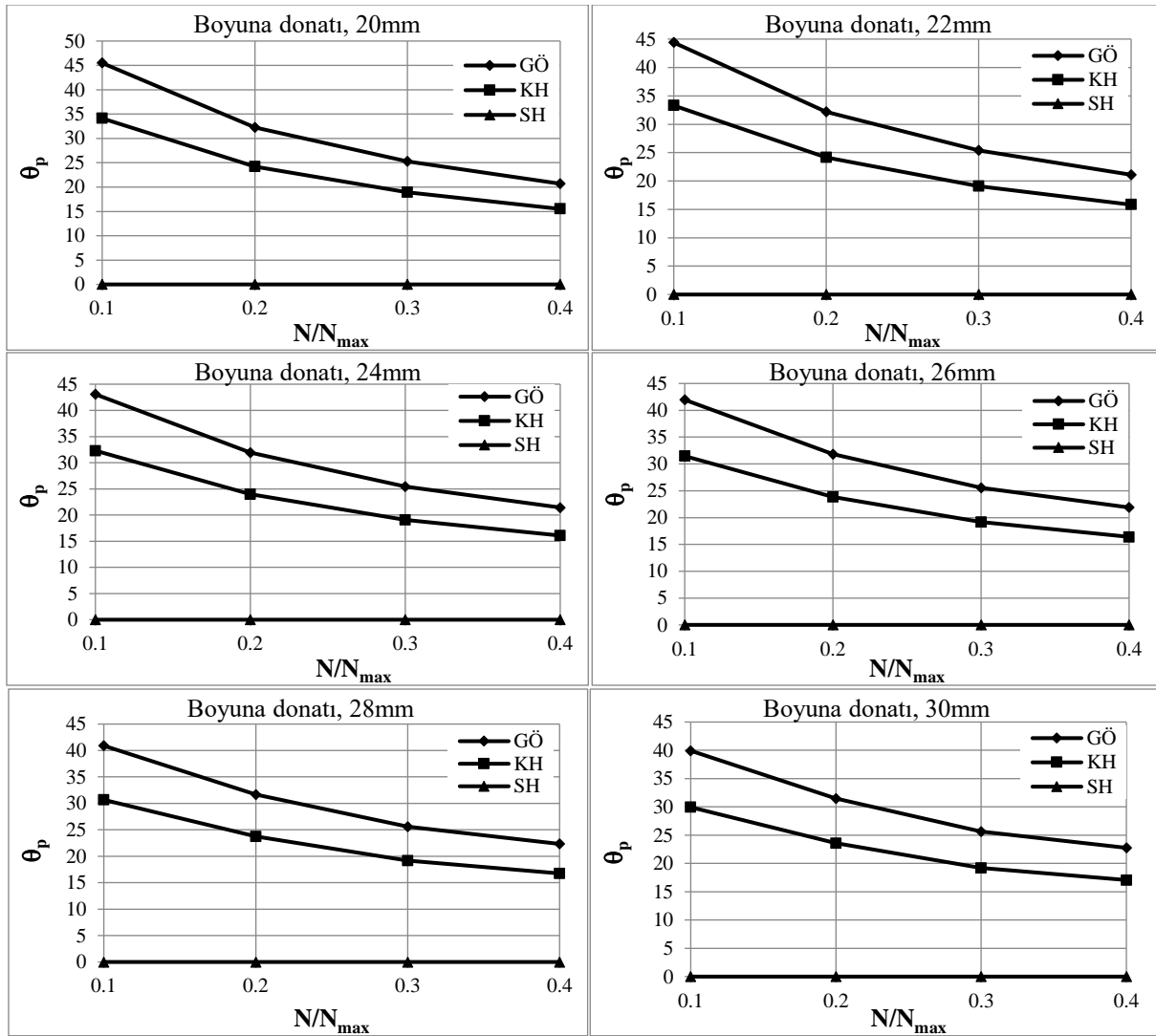
No	Boyuna donatı	Sargı donatı aralığı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
CR1	8Φ20	Φ10/50mm	ϵ_c	$0.0228 > \epsilon_c^{(GÖ)}$	0.0171	0.0025
CR2	8Φ22					
CR3	8Φ24					
CR4	8Φ26					
CR5	8Φ28					
CR6	8Φ30					

Çizelge 39. Dairesel kolonun farklı boyuna donatı aralığına göre hesaplanan donatı çeliği birim şekil değiştirme değerleri

No	Boyuna donatı	Sargı donatı aralığı	Şekil değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları	Performans düzeyi		
				GÖ	KH	SH
CR1	8Φ20	Φ10/50mm	ϵ_s	0.0320	0.0240	0.0075
CR2	8Φ22					
CR3	8Φ24					
CR4	8Φ26					
CR5	8Φ28					
CR6	8Φ30					

Çizelge 40. Dairesel en-kesitli kolonunun farklı boyuna donatı çapına göre hesaplanan plastik dönme değerleri

No	Boyuna donatı	Sargı donatı aralığı	Eksenel Yük N/N_{max}	Plastik dönmeler θ_p	Performans düzeyi		
					GÖ	KH	SH
CR2	8 Φ 22	Φ 10/50mm	0.10	θ_p	44.39	33.29	0
			0.20		32.20	24.15	
			0.30		25.42	19.07	
			0.40		21.10	15.83	
CR3	8 Φ 24	Φ 10/50mm	0.10	θ_p	43.07	32.30	0
			0.20		31.96	23.97	
			0.30		25.46	19.09	
			0.40		21.44	16.08	
CR4	8 Φ 26	Φ 10/50mm	0.10	θ_p	41.96	31.47	0
			0.20		31.82	23.86	
			0.30		25.55	19.17	
			0.40		21.89	16.41	
CR5	8 Φ 28	Φ 10/50mm	0.10	θ_p	40.90	30.67	0
			0.20		31.66	23.74	
			0.30		25.60	19.20	
			0.40		22.33	16.75	
CR6	8 Φ 30	Φ 10/50mm	0.10	θ_p	39.92	29.94	0
			0.20		31.48	23.61	
			0.30		25.65	19.23	
			0.40		22.76	17.07	

**Şekil 10.** Dairesel en-kesitli kolonların farklı boyuna donatı çapına göre eksenel yük seviyesi-plastik dönme grafikleri

Yapısal elemanların deprem performansının belirlenmesi için bu çalışmada, TBDY (2018)'de betonarme elemanlar için öngörülen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları analitik olarak incelenmiştir. Tasarlanan kare, dikdörtgen ve dairesel en-kesitli betonarme kolonların davranışı, malzemelerin doğrusal olmayan davranışları göz önüne alınarak elde edilen moment-eğrilik analizlerinden; eksenel yük değerinin artışıyla birlikte betonarme kolon kesitlerinin M_y , Φ_y ve M_u değerlerinde artış ve Φ_u değerlerinde azalma görülmektedir. Sargı donatısı çapının artmasıyla M_y , Φ_y , M_u ve Φ_u değerleri artmaktadır. Sargı donatısı aralığının artmasıyla M_y ve Φ_y değerleri sabit kalmakta, M_u ve Φ_u değerleri azalmaktadır. Boyuna donatı çapının artmasıyla M_y , Φ_y ve M_u değerleri artmakta ve Φ_u değerlerinde azalma görülmektedir. TBDY (2018)'e göre hesaplanan θ_y , eksenel yük seviyesi (N/N_{max}), boyuna donatı ve sargı donatı çapının artması ile artmakta fakat sargı donatı aralığının artması ile azalmaktadır.

Farklı performans düzeyleri için ε_c sınır değerleri, farklı sargı donatı çapı, sargı donatı aralığı ve boyuna donatı çapı için hesaplanmıştır. Farklı performans düzeyi için ε_s sınır değerleri; donatı çeliğinin çekme dayanımına karşı gelen birim uzama değerine bağlı olarak hesaplanmıştır. θ_p için izin verilen sınır değerler, kesite etkiyen eksenel kuvvet, sargılı ve sargısız beton modelleri ve donatı çeliği dikkate alınarak yapılan eğrilik analizi sonuçlarına göre hesaplanmıştır.

Sargı donatı aralığının artması ile farklı performans düzeyi için hesaplanan $\varepsilon_c^{(GÖ)}$, $\varepsilon_c^{(KH)}$ değerleri azalmaktadır. Farklı sargı donatı çapı, sargı donatı aralığı ve boyuna donatı çapına göre hesaplanan ε_c değerleri SH performans düzeyi için sabittir ($\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0025$). Betonarme kolon kesitlerinde farklı sargı donatı çapı, sargı donatı aralığı ve boyuna donatı çapına göre farklı performans düzeyinde hesaplanan $\varepsilon_s^{(GÖ)}$, $\varepsilon_s^{(KH)}$ ve $\varepsilon_s^{(SH)}$ değerleri sabittir. Bunun nedeni yönetmelikte donatı çeliği için verilen hasar sınırları; donatı çeliğinin kopma dayanımının farklı hasar seviyeleri için farklı sabit katsayılar ile çarpılarak bulunmasıdır.

Eksenel yük seviyesi (N/N_{max}) ve sargı donatı aralığının azalması ile farklı performans düzeylerinde hesaplanan $\theta_p^{(GÖ)}$ ve $\theta_p^{(KH)}$ değerleri artmaktadır. Betonarme kolon kesitlerinde sabit eksenel yük seviyeleri ve artan sargı donatısı çapı için farklı performans düzeyi için hesaplanan $\theta_p^{(GÖ)}$ ve $\theta_p^{(KH)}$ değerleri artmaktadır. SH performans düzeyinde taşıyıcı sistemlerde plastik mafsall oluşmasına izin verilmediği için farklı parametrelere göre betonarme kolon kesitlerinde $\theta_p^{(SH)} = 0$ elde edilmiştir.

4. Sonuç

Tasarlanan kolon kesitlerinden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- TBDY (2018)'de donatı çeliği için farklı performans düzeylerinde verilen hasar sınırları, donatı çeliğinin çekme dayanımına karşı gelen birim uzama değerini sabit katsayılar ile çarpılarak elde edilmektedir. SH performans düzeyi için verilen hasar sınırı ise sabit bir değer olarak verilmektedir ($\varepsilon_s^{(SH)} = 0.0075$).
- Sargılı beton için verilen hasar sınırları ($\varepsilon_c^{(GÖ)}$, $\varepsilon_c^{(KH)}$), donatı çeliği ve betonun ortalama dayanımı (f_{ye} , f_{ce}), $\rho_{sh,min}$ ve sargı donatısının konfigürasyonuna bağlı olarak hesaplanmaktadır. Sargılı betonun SH performans düzeyi için hasar sınırı ise sabit değer olarak verilmektedir ($\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0025$).
- $\varepsilon_c^{(GÖ)}$ ve $\varepsilon_c^{(KH)}$ hasar sınırları farklı boyuna donatı çapı, sargı donatı çapı ve sargı donatı aralığına göre değişmektedir. Tasarlanan kolon kesitlerinde sabit boyuna donatı ve sargı donatı çapı için sargı donatı aralığının artması ile $\varepsilon_c^{(GÖ)}$ ve $\varepsilon_c^{(KH)}$ değerleri azalmaktadır.
- Tasarlanan kolon kesitlerinde sabit boyuna donatı çapı ve sargı donatı aralığı için sargı donatı çapının artması ile $\varepsilon_c^{(GÖ)}$, $\varepsilon_c^{(KH)}$ değerleri artmaktadır.
- Boyuna donatı çapının artması kolon kesitlerinde sargılı beton basınç dayanımını çok fazla değiştirmedeği için şekil değiştirme sınırlarının hesaplanmasında, ε_c değerlerini çok fazla etkilememiştir. Tasarlanan kolon kesitlerinde sabit sargı donatı çapı ve sargı donatı aralığı için boyuna donatı çapının artması ile $\varepsilon_c^{(GÖ)}$, $\varepsilon_c^{(KH)}$ değerlerini çok fazla etkilememiştir.
- Farklı performans düzeyi için verilen plastik dönme hasar sınırları (θ_p); Φ_y , Φ_u , L_p , L_s ve d_b 'nin fonksiyonudur. Dolayısıyla eksenel yük seviyesi, sargı donatı oranı, boyuna donatı oranı, kesit geometrisi ve sargı donatısının konfigürasyonu gibi Φ_y ve Φ_u değerlerini etkileyen parametreler θ_p değerlerini de etkilemektedir.
- $\theta_p^{(GÖ)}$ ve $\theta_p^{(KH)}$ hasar sınırları, moment-eğrilik ilişkisi ve eksenel yük seviyelerine göre değişmektedir.
- Sabit eksenel yük seviyesi, boyuna donatı ve sargı donatı çapı için sargı donatı aralığının artması ile $\theta_p^{(GÖ)}$ ve $\theta_p^{(KH)}$ değerleri azalmaktadır.
- Sabit eksenel yük seviyesi, boyuna donatı ve sargı donatı aralığı için sargı donatı çapının artması ile $\theta_p^{(GÖ)}$ ve $\theta_p^{(KH)}$ değerleri artmaktadır.
- Sabit eksenel yük seviyesi, sargı donatı çapı ve sargı donatı aralığı için boyuna donatı çapının artması ile $\theta_p^{(GÖ)}$ ve $\theta_p^{(KH)}$ değerleri artmaktadır.
- Sabit boyuna donatı çapı, sargı donatı çapı ve aralığı için eksenel yük seviyesinin artması ile $\theta_p^{(GÖ)}$ ve $\theta_p^{(KH)}$ değerleri azalmaktadır.
- Doğrusal olmayan hesap yöntemine göre performans değerlendirmelerinde en önemli aşamalardan birisi yapısal elemanlardaki GÖ, KH ve SH hasar düzeylerinin belirlenmesidir. Yapısal elemanlarda oluşacak hasarı belirlemek için değerlendirmeye esas alınan şekil değiştirme talepleri de büyük önem arz etmektedir.

Referanslar

- Aydemir, C., Kırçıl, M. S., Hancıoğlu, B., & Zorbozan, M. (2011). Betonarme Kolonların Hasar Sınır Eğriliklerinin Belirlenmesi, İMO Teknik Dergi, 361(22), 5613-5642.
- Celep, Z., & Kumbasar N. (2004). Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul, 596s.
- Çavdar, Ö., Bayraktar, E. & Çavdar, A. (2015). Mevcut Perdeli Betonarme Bir Yapı İndoğrusal Olmayan Yöntemle Deprem Performansının Belirlenmesi, International Burdur Earthquake & Environment Symposium (IBEES2015), 7-9 May 2015, Mehmet Akif Ersoy University, Burdur, Türkiye, 233-241.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N. & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, 114(8), 1804-1826.
- SAP2000. Structural software for analysis and design, Computers and Structures, Inc. Version 20.2.0. USA.
- Sinani, B. (2014). Mevcut betonarme yapıların deprem performansının analizi. T.C. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Niğde.
- TBDY. (2018). Türkiye bina deprem yönetmeliği, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- TS500. (2000). Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.



Çözündürme ve Yaşlandırma İşleminin Al-7Si-4Zn-3Cu Alaşımının Sürtünme ve Aşınma Özelliklerine Etkisi

Effect of Age Hardening on the Wear Behaviour of the Al-7Si-4Zn-3Cu Alloy

Yasin Alemdağ¹ , Murat Beder² 

¹Department of Mechanical Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon-TURKEY

²Department of Mechanical Engineering, Gümüşhane University, Gümüşhane-TURKEY

Başvuru/Received: 25/02/2019

Kabul/Accepted: 15/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Bu çalışmada, çözündürme ve su verme işleminden sonra T6 ve T7 koşullarında yaşlandırma işlemine tabi tutulan Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının sürtünme ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar söz konusu alaşımın dökülmüş durumu ile karşılaştırılmıştır. Bu işlemlerden sonra alaşımın sürtünme katsayısının arttığı ancak aşınma kaybının azaldığı gözlenmiştir. Özellikle T6 ve T7 ısıtma işlemleri uygulanmış alaşımın yüksek yük ve kayma hızlarında dökülmüş durumuna göre oldukça üstün aşınma direnci sergilediği görülmüştür. Diğer taraftan T6 ısıtma işleminin T7 ısıtma işlemine göre alaşımın aşınma direnci üzerinde daha etkili olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar hem dökülmüş hem de ısıtma işlemi görmüş durumdaki alaşımın sertlik ve mukavemetleri ile bu alaşımda ortaya çıkan aşınma mekanizmalarına dayandırılarak açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Al-Si alaşımları, mikro yapı, yaşlandırma, sürtünme ve aşınma”

Abstract

In this study, the friction and wear properties of the Al-7Si-4Zn-3Cu alloy aged T6 and T7 conditions after its solutionizing and quenching treatment were investigated. The results obtained from heat treated alloy were compared to its as-cast state. The friction coefficient of the alloy increased but its volume loss decreased after the T6 and T7 heat treatments. It was especially observed that the alloy aged T6 and T7 conditions exhibited higher wear resistance than its as-cast state at high load and sliding speed. On the other hand, T6 heat treatment was determined to be more powerful effect than the T7 to improve the wear resistance of the alloy. The results obtained were explained in terms of the hardness and strength of the alloy with its wear mechanism at both heat treated and as-cast states.

Key Words

“Al-Si alloys, microstructure, quench aging, mechanical properties, friction and wear”

1. Giriş

Alüminyum-silisyum alaşımları özgül mukavemetinin (mukavemet/yoğunluk) ve aşınma direncinin yüksek olması, döküme ve işlenmeye elverişli olması, yüksek korozyon direncine ve termal iletkenliğe sahip olması gibi bazı üstün özelliklere sahiptir (Bai & Biswas, 1987; Clarke & Sarkar, 1979; Jasim & Dwarakadasa, 1987; Sarkar, 1975; Sarkar & Clarke, 1980; Torabian, Pathak, & Tiwari, 1994). Bu özelliklerin söz konusu alaşımların içerdiği silisyum oranına bağlı olduğu bilinmektedir (Alemdag & Beder, 2014; El-Salam, El-Khalek, Nada, Wahab, & Zahran, 2010; Nikanorov et al., 2005; Sarkar & Clarke, 1980). Silisyum oranı arttıkça bu alaşımların sertliğinin sürekli arttığı çekme dayanımlarının ise yaklaşık %12 Si oranında en yüksek değerine ulaştıktan sonra bir düşüş sergilediği belirlenmiştir (Bai & Biswas, 1987; Jasim & Dwarakadasa, 1987; Sarkar & Clarke, 1980; Torabian et al., 1994). Diğer taraftan Al-Si alaşımların aşınma direncinin artan silisyum oranı ile arttığı, özellikle aşırı yük ve hızlarda ötektik üstü alaşımların gerek ötektik gerekse ötektik altı alaşımlardan daha üstün aşınma davranışı ortaya koyduğu görülmüştür (Dwivedi, 2010; Ye, 2003). Ancak ötektik üstü alaşımların içyapılarında bulunun sert ve gevrek iri silisyum parçacıklarının hem bu alaşımların işlenmesinde kullanılan kesici takımların aşınmasına hem de eş çalıştığı yüzeylerde abrazyona yol açtığı tespit edilmiştir (Alemdag & Beder, 2014; Alemdag & Savaskan, 2008; Cui, Schulz, Matthaei-Schulz, & Zoch, 2009; Prasad, 1997; Savaskan & Aydiner, 2004; Savaskan & Bican, 2005). Bu durumun ötektik üstü alaşımların kullanımını sınırlayan önemli bir sorun olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle Al-Si esaslı alaşım grubu içerisinde ötektik altı Al-7Si ve ötektik Al-12Si esaslı alaşımların içten yanmalı motorlara ait bazı parçaların üretiminde ve kaymalı yatak yapımında daha yaygın kullanıldığı göze çarpmaktadır.

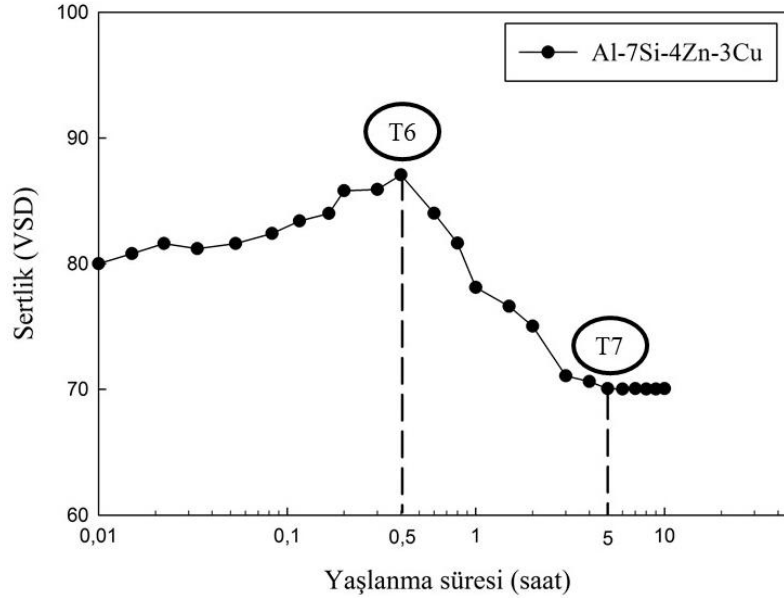
İkili Al-Si alaşımlarının mekanik ve tribolojik özelliklerinin pek çok uygulama için yeterli olmadığı bilinmektedir (Chen & Thomson, 2010; Eshaghi, Ghasemi, & Rassizadehghani, 2011; Raghavan, 2007; Savaskan, Hekimoglu, & Purcek, 2004; Tiryakioglu, 2008; Zedan, Samuel, Samuel, & Doty, 2010). Bu özelliklerin iyileştirilmesinde alaşımlama ve ısıl işlemin en uygun ve kolay uygulanabilir yöntemler olduğu görülmüştür (Anasyida, Daud, & Ghazali, 2010; Cho, Hockey, Lawn, & Bennison, 1989; Fatahalla, Hafiz, & Abdulkhalek, 1999; Kori, Murty, & Chakraborty, 2000; Mohamed, Samuel, Samuel, & Doty, 2009; Nogita et al., 2010; Xu, Yang, Wang, & Jiang, 2007). Bu nedenle Al-Si alaşımlarına bakır, demir, magnezyum, mangan, nikel, kurşun ve çinko gibi alaşım elementleri katılmış, elde edilen bazı alaşımlara ise normalizasyon, çözündürme ve yaşlandırma gibi ısıl işlemler uygulanmıştır (Chen & Thomson, 2010; Eshaghi et al., 2011; Raghavan, 2007; Savaskan & Aydiner, 2004; Savaskan et al., 2004; Tiryakioglu, 2008; Zedan et al., 2010). Alaşım elementleri arasında magnezyum, bakır ve çinko elementlerinin, ısıl işlemler içerisinde ise çözündürme ve yaşlandırma ısıl işleminin söz konusu alaşımların özelliklerini iyileştirmede çok daha etkili olduğu görülmüştür (Alemdag & Beder, 2014; Birol, 2008; Cho et al., 1989; Kori et al., 2000; Nogita et al., 2010). Alemdağ ve Beder (2014) tarafından yapılan bir çalışmada çinko ve bakırın Al-7Si esaslı alaşımın mekanik ve aşınma özellikleri üzerindeki etkisi sistematik olarak incelenmiş, bu çalışmanın sonucunda üçlü Al-7Si-4Zn ve dördü Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımları geliştirilmiştir (Alemdag & Beder, 2014). Diğer taraftan dördü Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının üçlü Al-7Si-4Zn alaşımına göre daha üstün mekanik ve tribolojik özellikler sergilediği belirlenmiştir (Alemdag & Beder, 2014). Bu durumun bakırın düşük oranlarda da olsa α -Al fazı içerisindeki çözünürlüğünden ve bakırca zengin CuAl_2 (θ) fazının oluşumundan kaynaklandığı belirlenmiştir (Chen & Thomson, 2010; Eshaghi et al., 2011; Raghavan, 2007; Savaskan & Aydiner, 2004; Savaskan et al., 2004; Tiryakioglu, 2008; Zedan et al., 2010). Ancak bu alaşımın çözündürme ve yaşlandırma uygulanmış durumundaki aşınma davranışı henüz belirlenmemiştir. Bu nedenle bu çalışmada çözündürme ve yaşlandırma ısıl işleminin söz konusu alaşımın sürtünme ve aşınma özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda çözündürme ve su verme işlemin ardından yaşlandırma işlemine tabi tutulan alaşımın yaşlandırılmış (T6) ve aşırı yaşlandırılmış (T7) durumundaki özellikleri döküm durumu ile karşılaştırılıp bu işlemlerin söz konusu alaşımın sürtünme ve aşınma davranışına etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Gereç ve yöntemler

2.1. Alaşım Üretimi, ısıl işlemi ve içyapısı

Bu çalışma için kullanılan Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımı kokil kalıba döküm yöntemi ile üretildi. Alaşımın üretiminde ticari saflıkta Al (%99,7), yüksek saflıkta Zn (%99,9), Al-50Cu ve Al-12Si alaşımları kullanıldı. Bu malzemeler bir elektrikli fırın içerisine 700°C sıcaklıkta ertildikten sonra 5 dakika süreyle karıştırıldı ve ardından 690 °C'den oda sıcaklığında tutulan orta karbonlu çelikten imal edilmiş Ø57 mm x Ø72 mm x 180 mm boyutlarındaki konik kalıba dökülerek katılaştırıldı. Katılama tamamlandıktan sonra alaşım kalıptan çıkarıldı ve kimyasal bileşimi spektral analiz yöntemi kullanılarak belirlendi. Bu analiz sonucunda alaşımın kimyasal bileşiminde %85,2 Al, %7,3 Si, %4,3 Zn ve %3,2 Cu bulunduğu tespit edildi. Söz konusu alaşımdan talaşlı imalat yöntemi ile 10 mm x 10 mm x 20 mm boyutunda numuneler hazırlandı. Bu numuneler 450 °C sıcaklıkta 36 saat çözündürme işlemine tabii tutulduktan sonra suda soğutuldu ve 150 °C sıcaklıkta 10 saat süreyle yapay yaşlandırıldı. Bu süreç zarfında çeşitli zaman aralıklarında numunelerin sertlikleri ölçüldü ve alaşımın sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri elde edildi, Şekil 1. Bu eğriden yararlanarak T6 ve T7 ısıl işlemleri için yaşlandırma süresi sırasıyla 30 dakika ve 5 saat olarak belirlendi.

Metalografik incelemeler için hem dökülmüş hem de ısıl işlem görmüş alaşımdan alınan numuneler soğuk kalıplama, taşlama ve parlatma işlemlerinden oluşan standart metalografi yöntemiyle hazırlandı. Bu numuneler nitrik asit (% 6 HN03 +% 94 alkol) çözeltisi içerisinde dağlandı. Dağlama işleminin ardından numunelerin içyapıları optik mikroskopta incelenerek (OM) fotoğrafları çekildi.



Şekil 1. Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri

2.2. Sertlik ve çekme deneyleri

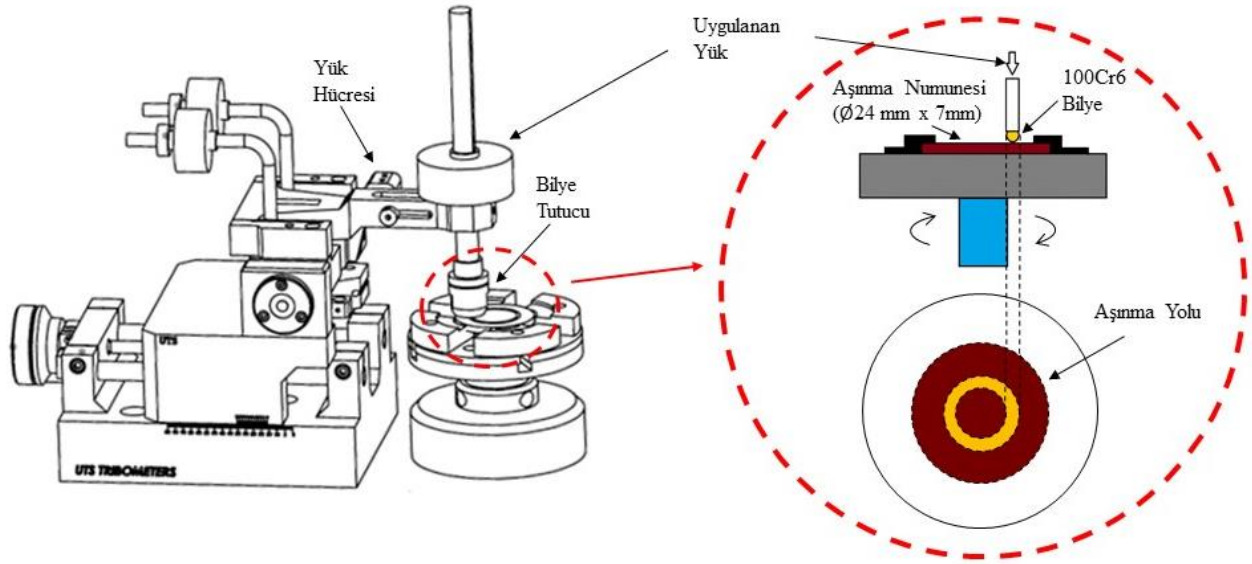
Dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumdaki alaşımın sertliği 50 gf büyüklüğünde bir yük kullanılarak Vickers sertlik ölçme yöntemi ile ölçüldü. Alaşımın çekme dayanımının belirlenmesinde tel erozyon yöntemi ile 2,5 mm x 5,6 mm x 20 mm boyutlarında üretilen yassı biçimde numuneler kullanıldı ve bu numuneler oda sıcaklığında $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında çekme deneyine tabi tutuldu. Sertlik ve çekme deneyleri için en az beş ölçüm yapıldı ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak söz konusu değerler belirlendi.

2.3. Sürtünme ve aşınma deneyleri

Alaşımın sürtünme ve aşınma deneyleri ASTM: G99 standartlarına uygun olarak tasarlanmış bilye-disk esaslı bir deney düzeneğinde gerçekleştirildi. Bu deney düzeneğinin genel görünümü ile test bölgesinin ayrıntısı Şekil 2'de şematik olarak gösterilmiştir. Sürtünme ve aşınma deneyleri için dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumdaki alaşımdan $\varnothing 24 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ boyutlarında numuneler hazırlandı. Bu numunelerin yüzeyleri otomatik taşlama ve parlatma makinasında taşlandı ve ardından da parlatıldı. Bu işlemlerden sonra numunelerin yüzey pürüzlülüğü $0,15 \pm 0,05 \text{ }\mu\text{m}$ olarak ölçüldü. Söz konusu numuneler için aşındırıcı yüzey olarak 6 mm çapında 100Cr6 çelik bilye kullanıldı.

Sürtünme ve aşınma deneylerinden önce numuneler ultrasonik bir temizleyicide temizlendi ve kütleleri $\pm 0,01 \text{ mg}$ hassasiyete sahip bir terazi ile ölçüldü. Bu işlem aşınma deneyinden sonra da tekrarlandı ve ölçülen kütle kaybı alaşımın yoğunluğuna bölünerek hacim kaybına dönüştürüldü. Sürtünme ve aşınma deneyleri $0,16 \text{ ms}^{-1}$ lik kayma hızında ve farklı yüklerde (2,5-12,5 N) ve 5N'luk sabit bir yükte ve farklı kayma hızlarında ($0,08-0,22 \text{ ms}^{-1}$) 1000 m'lik yola karşılık gelen kayma mesafesinde yapıldı. Her bir koşul için sürtünme kuvveti bir sensör vasıtasıyla ölçüldü ve bu değerler bir yazılım ile bilgisayar ortamına aktarıldı. Ölçülen sürtünme kuvveti normal yüke bölünerek sürtünme katsayısına dönüştürüldü ve bu değerlerin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler elde edildi. Sürtünme katsayısının kararlı değişim sergilediği bölgedeki ortalama değerleri alınarak farklı yük ve kayma hızlarındaki alaşıma ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri belirlendi.

Alaşımın dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumdaki etkin aşınma mekanizmasını belirlemek için aşınma deneylerinden sonra bunlara ait numunelerin yüzeyleri bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendi ve fotoğrafları çekildi.

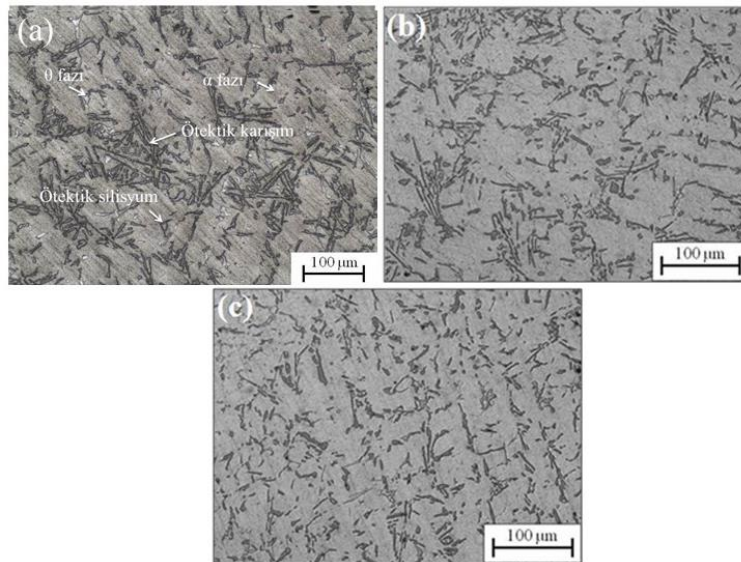


Şekil 2. Bilye-disk esaslı aşınma düzeneğinin ve test bölgesinin şematik gösterimi.

3. Bulgular ve tartışma

3.1. Yapısal incelemelerden elde edilen bulgular

Alaşımın döküm ve ısıl işlem görmüş durumundaki iç yapısını gösteren OM fotoğrafları Şekil 3 (a-c) verilmiştir. Dökülmüş durumdaki alaşımın iç yapısının α -Al dendritleri, lamel biçimindeki α -Al-Si ötektik karışımı, çok az miktarda birincil silisyum kristalleri ve bakırca zengin CuAl_2 (θ) fazından oluştuğu görülmüştür, Şekil 3 (a). Bu durum söz konusu alaşımın katılaşma davranışına dayandırılarak açıklanabilir. Ötektik altı olan bu alaşım, katılaşmaya başladığında ilk önce dendrit biçimindeki α -Al taneleri oluşur ve bu taneler sürekli sıvıdan atom çekerek büyürler. Geriye kalan sıvının kimyasal bileşimi ötektik dönüşüm için gerekli bileşime ulaştığında ötektik dönüşüm meydana gelir ve bunun sonucunda α -Al ve Si kristallerinden oluşan lamel biçimindeki faz karışımı meydana gelir. Ancak çinkonun tamamının ve bakırın ise yaklaşık %1,5 oranında alüminyum içerisinde çözüldüğü geriye kalan bakırın ise alüminyumla reaksiyona girerek θ kristallerini oluşturduğu görülmüştür. Bu durum ötektik dönüşümün %12 Si oranından daha düşük silisyum oranların da meydana gelmesine yol açmış olabilir. Nitekim alaşımlarında gözlenen birincil Si kristallerinin Al-Si faz diyagramındaki ötektik noktanınsola doğru kaymasından dolayı oluştuğu düşünülmektedir. T6 ve T7 ısıl işlemleri sonucunda alaşımın dendritik yapısının nispeten ortadan kalktığı gözlenmiştir, Şekil 3 (b,c). Bu durum çözündürme işlemi sonucunda elde edilen α -Al matrisinin hızlı soğutulması neticesinde dendritik formunu kaybetmesinden kaynaklanmış olabilir.



Şekil 3. Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının (a)dökülmüş (b) T6 ve (c) T7 ısıl işlem görmüş durumundaki iç yapısını gösteren OM fotoğrafları

3.2. Sertlik ve Çekme Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

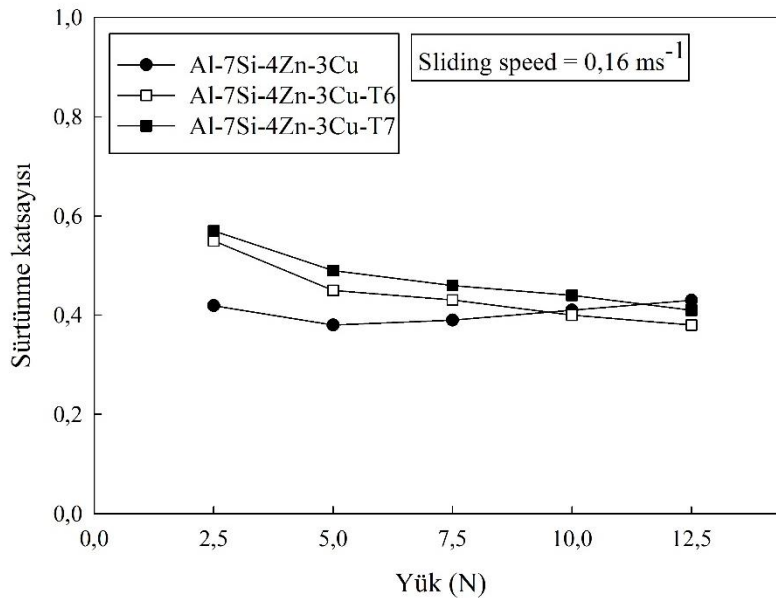
Dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumdaki alaşımın sertliği, akma ve çekme dayanımları ile kopma uzaması değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu tabloda görüldüğü gibi alaşımın sertliği T6 ısıtılmış işlemi sonunda artmış, T7 ısıtılmış işleminden sonra ise azalmıştır. Diğer taraftan hem T6 hem de T7 ısıtılmış işlemi sonucunda alaşımın akma ve çekme dayanımı ile kopma uzaması değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar söz konusu alaşımın yaşlanma davranışına dayandırılarak açıklanabilir (Chen & Thomson, 2010; Eshaghi et al., 2011; Raghavan, 2007; Savaskan & Aydinler, 2004; Savaskan et al., 2004; Tiryakioglu, 2008; Zedan et al., 2010). Çözündürme işlemi uygulanan alaşımda bakırın α -Al matrisi içerisinde çözündüğü ancak silisyum parçacıklarının bu işlemle etkilenmediği görülmüştür. Su verme işleminden sonra elde edilen aşırı doymuş katı çözeltilerin yaşlandırılması sonucunda θ fazının tekrar oluştuğu belirlenmiştir. Bu fazın α -Al matrisinden ayrışması sırasında ortaya çıkan bağdaşıklık gerilmeleri α -Al matrisinin kafes yapısını çarpıtmış olabilir. Bu durum dislokasyon hareketlerini zorlaştırarak veya engelleyerek alaşımın sertlik ve mukavemetinin artmasına yol açmış olabilir. Ancak aşırı yaşlandırma döneminde bağdaşıklık durumunun ortadan kalkması ile birlikte α -Al matrisindeki gerilmeler azalmaya başlar. Bu aşamada alaşımın sertliği azalarak belirli bir yaşlandırma süresinden sonra kararlı haline ulaşır. Sertlikteki düşüğe rağmen alaşımın akma ve çekme dayanımında belirlenen artış θ fazının dislokasyonların hareketini engellemesi sonucunda meydana gelmiş olabilir.

Tablo 1.Dökülmüş, T6 ve T7 ısıtılmış işlemleri görmüş alaşımın mekanik özellikleri

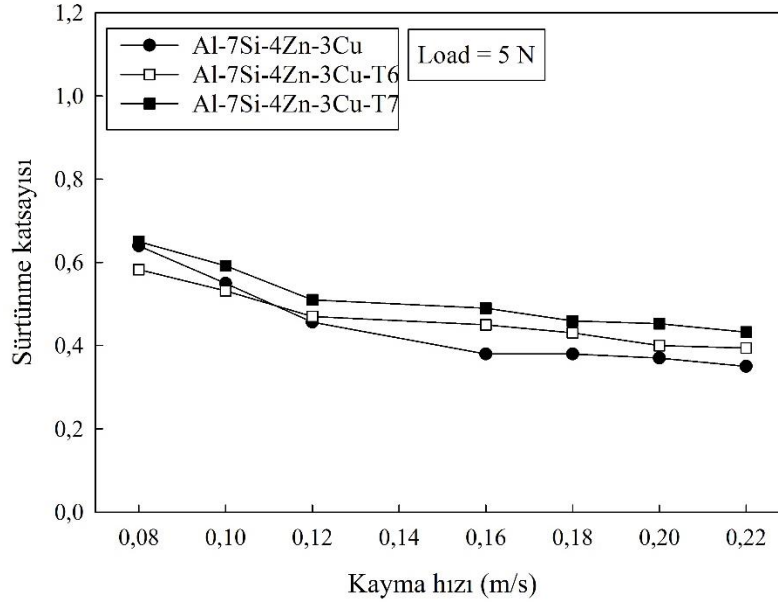
Alaşım	Sertlik (VSD)	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)
Al-7Si-4Zn-3Cu-Dökülmüş	81	156	110	1,9
Al-7Si-4Zn-3Cu-T6	87	214	141	2,7
Al-7Si-4Zn-3Cu-T7	71	225	155	2,3

3.3. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının hem döküm hem de ısıtılmış işlem görmüş durumundaki sürtünme katsayısının uygulanan yük ve kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 4 ve Şekil 5'de verilmiştir. Bu eğriler alaşımın sürtünme katsayısının artan yük ve kayma hızı ile azaldığını göstermektedir. Bu sonuçlar alaşımın tribolojik davranışına dayandırılarak açıklanabilir (Alemdag & Beder, 2014, 2015). Şöyle ki; sürtünme deneylerinden sonra alaşımın sürtünme yüzeyinde sıvanmış bir tabakanın oluştuğu ve bu tabakanın artan yük ve kayma hızı ile daha belirgin hale geldiği gözlenmiştir. EDS analizleri bu tabakanın Al, Si, Zn ve Cu elementlerinin yanı sıra yüksek oranda oksijen içerdiğini göstermiştir. Bilindiği gibi özellikle çinkonun oksidi hem yağlayıcı olarak davranmakta hem de sıvanmayı kolaylaştırmaktadır (Alemdag & Beder, 2014, 2015; Prasad et al., 1998; Sarkar, 1975; Sarkar & Clarke, 1980; Yasmin, Khalid, & Haque, 2004). Dolayısıyla, sıvanma tabakasının artan yük ve kayma hızı ile belirgin hale gelmesi kaymayı kolaylaştırarak sürtünme katsayısının azalmasına yol açmış olabilir.



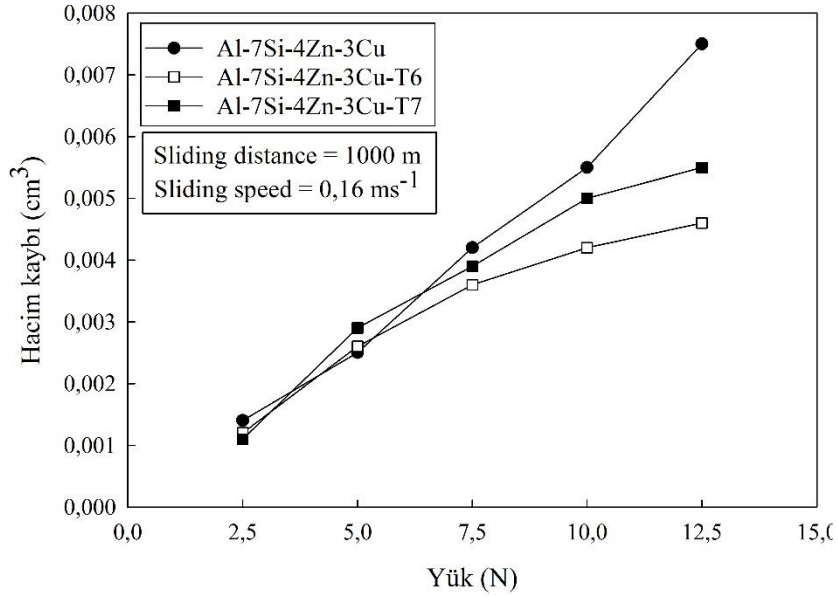
Şekil 4. Alaşımın sürtünme katsayısının uygulanan yük ile değişimini gösteren eğriler.



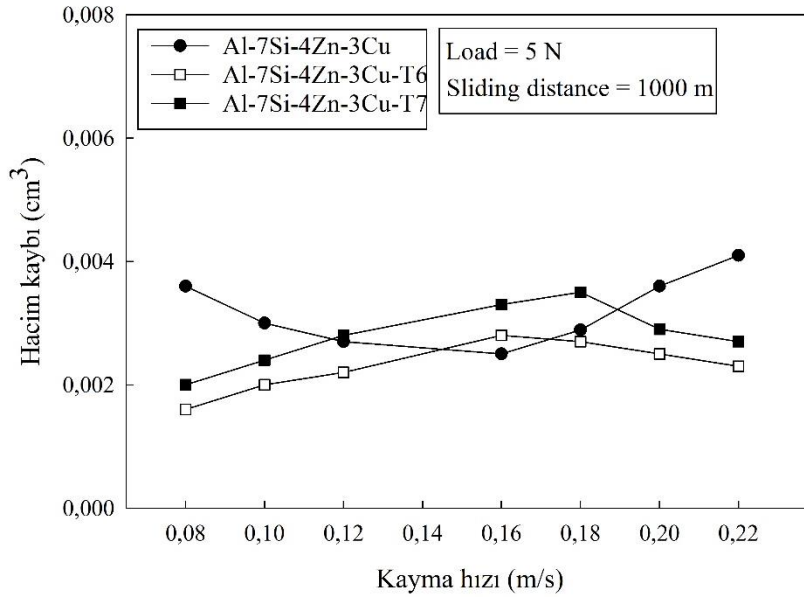
Şekil .5 Alaşımın sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimini gösteren eğriler.

Aşınma deneyleri sonucunda dökülmüş ve ısı işlem görmüş durumdaki alaşımda meydana gelen aşınma kaybının uygulanan yüke göre değişimini gösteren eğriler Şekil 6 verilmiştir. Alaşımın aşınma kaybının artan yük ile sürekli arttığı ancak ısı işlem görmüş durumdaki alaşımın 7,5 N'dan sonraki yüklerde dökülmüş durumundan daha yüksek aşınma direnci sergilediği görülmüştür, Şekil 6. Özellikle T6 ısı işleminin hemen hemen tüm koşullarda alaşımın aşınma direncini önemli oranda iyileştirdiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar alaşımın mekanik özelliklerine dayandırılarak açıklanabilir. T6 ve T7 ısı işlemlerinden sonra alaşımın akma ve çekme dayanımının arttığı görülmüştür. Bu özelliklerin yanı sıra T6 ısı işleminden sonra alaşımın sertliğinin de arttığı fakat T7 ısı işleminden sonra ise düştüğü belirlenmiştir. Metallerde meydana gelen aşınma kaybının uygulanan yük ile doğru orantılı olarak arttığı, bunların sertlik ve dayanımları ile ters orantılı olarak azaldığı bilinmektedir. Dolayısıyla ısı işleminden sonra alaşımın dayanımında meydana gelen artış bunların dökülmüş durumuna göre daha yüksek aşınma direnci sergilemesine yol açmış olabilir. T6 ısı işlemi uygulanmış alaşımın T7 uygulanmış durumundakinden daha yüksek aşınma direnci sergilemesi ise bu alaşımın sertliğinin söz konusu işleminden sonra artmasından kaynaklanmış olabilir.

Farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulmuş dökülmüş ve ısı işlem görmüş durumdaki alaşımda meydana gelen aşınma kaybının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'deki eğrilerden dökülmüş durumdaki alaşımda meydana gelen aşınma kaybının artan hız ile azalıp $0,16 \text{ ms}^{-1}$ lik kayma hızında en düşük değerine ulaştıktan sonra tekrar arttığı, T6 ve T7 ısı işlemi görmüş durumdaki alaşımın bu değerinin ise dökülmüş durumundakinin tersi bir değişim sergilediği görülmüştür. Bu sonuçlar alaşımın mekanik özelliklerine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki; dökülmüş durumdaki alaşımın akma dayanımının düşük olması aşınma sırasında oluşan aşınma parçacıklarının yüzeye sıvanmasını kolaylaştırmış olabilir. Ancak belli bir hız değerinden sonra sürtünme ısısına bağlı olarak oksitlenme hızının artması, deformasyon sertleşmesi ve yorulma gibi etkiler bu tabakanın yer yer parçalanmasına yol açarak aşınma kaybını arttırmış olabilir. Isı işlem görmüş durumdaki alaşımlarda ise aşınma parçacıkların yüzeye tekrar sıvanması bunların akma ve çekme dayanımlarının yüksek olması nedeni ile zorlaşabilir. Bu parçacıklar merkezkaç kuvvetinin etkisiyle yüzeyden uzaklaşarak aşınma kaybının artmasına yol açabilir. Ancak belirli bir hız değerinden sonra sürtünme ısısında meydana gelen artış T6 ve T7 işlemi uygulanmış alaşımın ana matrisinde bir yumuşamaya yol açarak yüzeyden kopan parçacıkların bir kısmının tekrar yüzeye gömülmesini kolaylaştırabilir. Bu durum söz konu işlemleri görmüş alaşımlarda belirli bir hız değerinden sonra aşınma kaybının azalmasına neden olabilir.

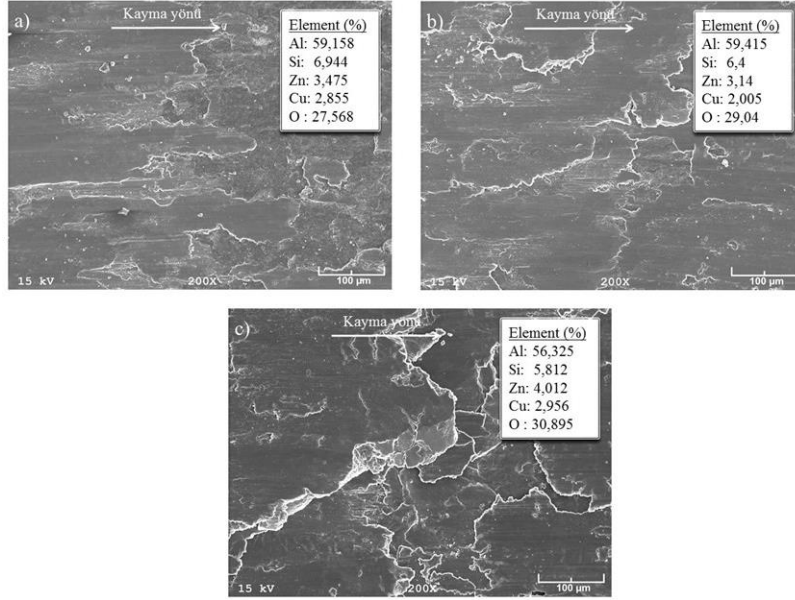


Şekil 6. Alaşımın aşınma kaybının uygulanan yüke göre değişimini gösteren eğriler

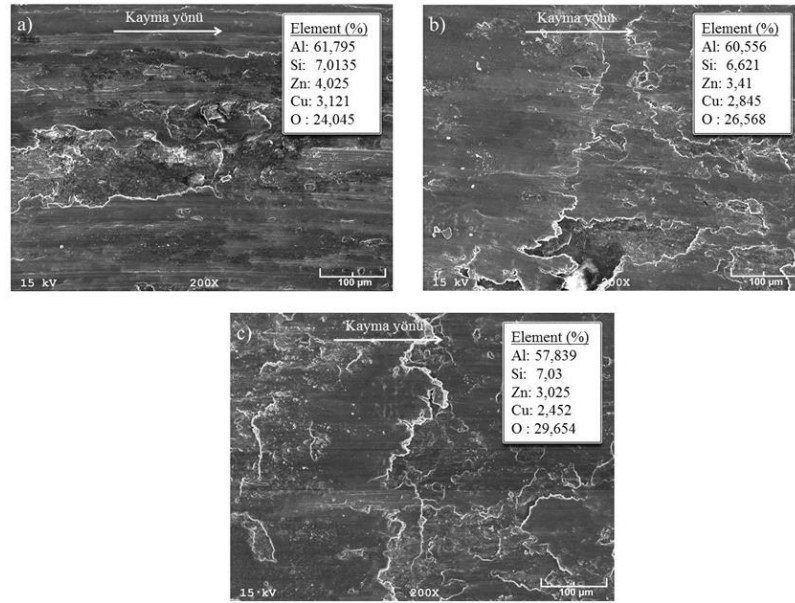


Şekil 7. Alaşımın aşınma kaybının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler

SEM incelemeleri hem dökülmüş hem de ısıl işlem görmüş durumdaki alaşımın aşınmış yüzeylerinin birbirine oldukça benzer olduğunu göstermiştir. Bu nedenle Şekil 8 ve Şekil 9'da düşük, orta ve yüksek yük ve kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyine gösteren fotoğraflar verilmiştir. Buna ek olarak aşınma yüzeylerinin kimyasal bileşimini gösteren EDS analiz sonuçları bu fotoğraflar üzerinde gösterilmiştir. T6 ve T7 ısıl işlemi görmüş durumdaki alaşımın aşınmış yüzeylerinden de benzer görüntüler ve analiz sonuçları elde edilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde alaşımın aşınmış yüzeylerinde sıvama tabakalarının oluştuğu ve bu tabakada zaman zaman soyulmaların meydana geldiği gözlenmiştir. Sıvanmanın yüzeyden kopan aşınma parçacıklarının numune ile bilye arasında hareket ederken tekrar geriye yapışması sonucunda oluştuğu düşünülmektedir. Ancak oksidasyon, deformasyon sertleşmesi ve yorulma gibi etkiler belirli bir kalınlığa ulaşan bu tabakada çatlakların oluşmasına yol açmış olabilir. Bu çatlakların birleşmesi sıvama tabakasının yer yer parçalanmasına dolayısıyla soyularak sürekliliğini kaybetmesine neden olabilir. Diğer taraftan yük ve kayma hızı arttıkça sıvanmanın ve soyulmanın daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Bu durum söz konusu koşullarda sürtünme ısısının ve oksitlenme hızının artmasından kaynaklanmış olabilir (Prasad et al., 1998; Yasmin et al., 2004).



Şekil 8.Farklı yüklerde ((a) 2,5N, (b) 7,5 N ve (c) 12,5 N) aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafları



Şekil 9.Farklı kayma hızlarında ((a) 0,08 m / s, (b) 0,18 m / s ve (c) 0,22 m / s) aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının aşınma yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları

4. Sonuçlar

Bu çalışmadan elde edilen ana sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının iç yapısının α -Al dendritleri, ötektik ve birincil silisyum parçacıkları ile θ fazından (CuAl_2) oluşmaktadır. Çözündürme ve yaşlandırma ısıl işleminden sonra alaşımın dendritik yapısı nispeten ortadan kalkmakta, ancak Si ve θ parçacıklarının morfolojisi bu işlemlerden fazla etkilenmemektedir.
- T6 ve T7 ısıl işlemleri alaşımın akma ve çekme dayanımını artırmaktadır. Diğer taraftan T6 ısıl işlemi alaşımın sertliğini de artırmakta, T7 ısıl işlemi ise düşürmektedir.
- Alaşımın hem dökülmüş hem de T6 ve T7 ısıl işlemlerini görmüş durumundaki sürtünme katsayısı artan yük ve kayma hızı ile azalmaktadır.
- Alaşımın incelenen tüm durumlarındaki aşınma kaybı artan yük ile nispeten doğrusal olarak artmaktadır. Diğer taraftan söz konusu alaşımın ısıl işlem görmüş durumlarındaki aşınma kaybı artan kayma hızı ile artmakta, kayma hızının belirli değerlerinden

(0,16-0,18 ms⁻¹) sonra bir düşüş sergilemektedir. Dökülmüş durumdaki alaşımın aşınma kaybı ise artan kayma hızı ile azalmakta 0,16 ms⁻¹'lik kayma hızında en düşük değerine ulaşıktan sonra artmaktadır.

e) T6 ve T7 ısıt işlemleri alaşımın aşınma direncini iyileştirmekte, bu iyileşme artan yük ve kayma hızlarında daha belirgin hale gelmektedir.

f) Hem dökülmüş hem de ısıt işlem görmüş alaşımın aşınmış yüzeylerinde sıvama tabakaları oluşmakta ve soyulmalar meydana gelmektedir. Alaşımın aşınma davranışı, bu iki etkin mekanizma tarafından kontrol edilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından desteklenen 8650 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Üniversitemiz ve ilgili biriminde görev alan yetkililere teşekkür ederiz.

Referanslar

- Alemdag, Y., & Beder, M. (2014). Microstructural, mechanical and tribological properties of Al-7Si-(0-5)Zn alloys. *Materials & Design*, 63, 159-167. doi:10.1016/j.matdes.2014.06.006
- Alemdag, Y., & Beder, M. (2015). DRY SLIDING WEAR PROPERTIES OF Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu ALLOYS. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 21(1), 154-165.
- Alemdag, Y., & Savaskan, T. (2008). Effects of silicon content on the mechanical properties and lubricated wear behaviour of Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si alloys. *Tribology Letters*, 29(3), 221-227. doi:10.1007/s11249-008-9299-0
- Anasyida, A. S., Daud, A. R., & Ghazali, M. J. (2010). Dry sliding wear behaviour of Al-12Si-4Mg alloy with cerium addition. *Materials & Design*, 31(1), 365-374. doi:10.1016/j.matdes.2009.06.007
- Bai, B. N. P., & Biswas, S. K. (1987). Characterization of Dry Sliding Wear of Al-Si Alloys. *Wear*, 120(1), 61-74. doi:10.1016/0043-1648(87)90133-5
- Biol, Y. (2008). Semisolid processing of near-eutectic and hypereutectic Al-Si-Cu alloys. *Journal of Materials Science*, 43(10), 3577-3581. doi:10.1007/s10853-008-2565-6
- Chen, C. L., & Thomson, R. C. (2010). The combined use of EBSD and EDX analyses for the identification of complex intermetallic phases in multicomponent Al-Si piston alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 490(1-2), 293-300. doi:10.1016/j.jallcom.2009.09.181
- Cho, S. J., Hockey, B. J., Lawn, B. R., & Bennison, S. J. (1989). Grain-Size and R-Curve Effects in the Abrasive Wear of Alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, 72(7), 1249-1252. doi:DOI 10.1111/j.1151-2916.1989.tb09718.x
- Clarke, J., & Sarkar, A. D. (1979). Wear Characteristics of as-Cast Binary Aluminium-Silicon Alloys. *Wear*, 54(1), 7-16. doi:10.1016/0043-1648(79)90044-9
- Cui, C. S., Schulz, A., Matthaeh-Schulz, E., & Zoch, H. W. (2009). Characterization of silicon phases in spray-formed and extruded hypereutectic Al-Si alloys by image analysis. *Journal of Materials Science*, 44(18), 4814-4826. doi:10.1007/s10853-009-3734-y
- Dwivedi, D. K. (2010). Adhesive wear behaviour of cast aluminium-silicon alloys: Overview. *Materials & Design*, 31(5), 2517-2531. doi:10.1016/j.matdes.2009.11.038
- El-Salam, F. A., El-Khalek, A. M. A., Nada, R. H., Wahab, L. A., & Zahran, H. Y. (2010). Effect of Sn content on the structural and mechanical properties of Al-Si alloy. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 527(4-5), 1223-1229. doi:10.1016/j.msea.2009.10.002
- Eshaghi, A., Ghasemi, H. M., & Rassizadehghani, J. (2011). Effect of heat treatment on microstructure and wear behavior of Al-Si alloys with various iron contents. *Materials & Design*, 32(3), 1520-1525. doi:10.1016/j.matdes.2010.10.014
- Fatahalla, N., Hafiz, M., & Abdulkhalek, M. (1999). Effect of microstructure on the mechanical properties and fracture of commercial hypoeutectic Al-Si alloy modified with Na, Sb and Sr. *Journal of Materials Science*, 34(14), 3555-3564. doi:10.1023/A:1004626425326
- Jasim, K. M., & Dwarakadasa, E. S. (1987). Wear in Al-Si Alloys under Dry Sliding Conditions. *Wear*, 119(1), 119-130. doi:10.1016/0043-1648(87)90102-5
- Kori, S. A., Murty, B. S., & Chakraborty, M. (2000). Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy and its modification with strontium. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 283(1-2), 94-104. doi:10.1016/S0921-5093(99)00794-7

- Mohamed, A. M. A., Samuel, A. M., Samuel, F. H., & Doty, H. W. (2009). Influence of additives on the microstructure and tensile properties of near-eutectic Al-10.8%Si cast alloy. *Materials & Design*, 30(10), 3943-3957. doi:10.1016/j.matdes.2009.05.042
- Nikanorov, S. P., Volkov, M. P., Gurin, V. N., Burenkova, Y. A., Derkachenko, L. I., Kardashev, B. K., . . . Wilcox, W. R. (2005). Structural and mechanical properties of Al-Si alloys obtained by fast cooling of a levitated melt. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 390(1-2), 63-69. doi:10.1016/j.msea.2004.07.037
- Nogita, K., Yasuda, H., Yoshiya, M., McDonald, S. D., Uesugid, K., Takeuchi, A., & Suzuki, Y. (2010). The role of trace element segregation in the eutectic modification of hypoeutectic Al-Si alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 489(2), 415-420. doi:10.1016/j.jallcom.2009.09.138
- Prasad, B. K. (1997). Effects of silicon addition and test parameters on sliding wear characteristics of zinc-based alloy containing 37.5% aluminium. *Materials Transactions Jim*, 38(8), 701-706. doi:DOI 10.2320/matertrans1989.38.701
- Prasad, B. K., Venkateswarlu, K., Modi, O. P., Jha, A. K., Das, S., Dasgupta, R., & Yegneswaran, A. H. (1998). Sliding wear behavior of some Al-Si alloys: Role of shape and size of Si particles and test conditions. *Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science*, 29(11), 2747-2752. doi:DOI 10.1007/s11661-998-0315-7
- Raghavan, V. (2007). Al-Si-Zn (Aluminum-Silicon-Zinc). *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 28(2), 197-197. doi:10.1007/s11669-007-9030-0
- Sarkar, A. D. (1975). Wear of Aluminium-Silicon Alloys. *Wear*, 31(2), 331-343. doi:Doi 10.1016/0043-1648(75)90167-2
- Sarkar, A. D., & Clarke, J. (1980). Friction and Wear of Aluminium-Silicon Alloys. *Wear*, 61(1), 157-167. doi:Doi 10.1016/0043-1648(80)90120-9
- Savaskan, T., & Aydiner, A. (2004). Effects of silicon content on the mechanical and tribological properties of monotectoid-based zinc-aluminium-silicon alloys. *Wear*, 257(3-4), 377-388. doi:10.1016/j.wear.2004.01.007
- Savaskan, T., & Bican, O. (2005). Effects of silicon content on the microstructural features and mechanical and sliding wear properties of Zn-40Al-2Cu-(0-5)Si alloys. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 404(1-2), 259-269. doi:10.1016/j.msea.2005.05.078
- Savaskan, T., Hekimoglu, A. P., & Purcek, G. (2004). Effect of copper content on the mechanical and sliding wear properties of monotectoid-based zinc-aluminium-copper alloys. *Tribology International*, 37(1), 45-50. doi:10.1016/S0301-679x(03)00113-0
- Tiryakioglu, M. (2008). Si particle size and aspect ratio distributions in an Al-7%Si-0.6%Mg alloy during solution treatment. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 473(1-2), 1-6. doi:10.1016/j.msea.2007.03.044
- Torabian, H., Pathak, J. P., & Tiwari, S. N. (1994). Wear Characteristics of Al-Si Alloys. *Wear*, 172(1), 49-58. doi:Doi 10.1016/0043-1648(94)90298-4
- Xu, C. L., Yang, Y. F., Wang, H. Y., & Jiang, Q. C. (2007). Effects of modification and heat-treatment on the abrasive wear behavior of hypereutectic Al-Si alloys. *Journal of Materials Science*, 42(15), 6331-6338. doi:10.1007/s10853-006-1189-y
- Yasmin, T., Khalid, A. A., & Haque, M. M. (2004). Tribological (wear) properties of aluminum-silicon eutectic base alloy under dry sliding condition. *Journal of Materials Processing Technology*, 153, 833-838. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.147
- Ye, H. Z. (2003). An overview of the development of Al-Si-alloy based material for engine applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12(3), 288-297. doi:Doi 10.1361/105994903770343132
- Zedan, Y., Samuel, F. H., Samuel, A. M., & Doty, H. W. (2010). Effects of Fe intermetallics on the machinability of heat-treated Al-(7-11)% Si alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(2), 245-257. doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.09.007



Impedimetric Cell Detection using Microfluidic Viscoelastic Focusing

Mikroakışkan Viskoelastik Hizalama ile Empedansa Dayalı Hücre Algılama

Çağlar Elbüken¹

¹UNAM- National Nanotechnology Research Center and Institute of Materials Science and Nanotechnology, Bilkent University, 06800 Ankara, TURKEY

Başvuru/Received: 25/02/2019

Kabul/Accepted: 30/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Abstract

Identification and successive separation of cell populations have a vast number of applications in both clinical research and basic sciences. In the last few decades several custom-made microfluidic systems have been developed to address the differentiation needs of the researchers. For all these systems there is a need for focusing the cells of interest in the interrogation zone during the flow. In this article, a new method of viscoelastic focusing was used for this purpose. By adding polymeric materials into the carrying fluid, elastic lift force was generated on the cells that allows passive particle focusing. Once the cells are aligned with the sensor, detection and identification was achieved using impedance characterization. The carrier fluid properties were investigated to achieve successful viscoelastic focusing and impedimetric detection. Two blood cell types, red blood cells and white blood cells, were differentiated based on their impedance signal. In addition to its capability as a microfluidic cell counter, this work reveals the possibility of using viscoelastic focusing for flow through impedance based particle characterization.

Key Words

“Microfluidics, cell counting, impedance detection, viscoelastic focusing”

Öz

Farklı tipteki hücrelerin karakterize edilebilmesi ve ayrıştırılması hem klinik araştırmalarda hem de temel bilimde çok fazla uygulama alanı olan konulardır. Son yıllarda araştırmacıların çalıştıkları hücre tiplerine özel algılama yapabilen birçok mikroakışkan sistem geliştirilmiştir. Bütün bu sistemler için en temel gereksinim hücrelerin algılama yapılan bölgede hizalanmalarının sağlanmasıdır. Bu çalışmada hücre hizalaması ve sonrasında algılama için yeni bir teknik olan viskoelastik hizalama kullanılmıştır. Taşıyıcı sıvıda polimerik malzemeler çözülerek, sıvıdaki hücreler üzerinde bir elastik kaldırma kuvveti oluşturulmuştur. Böylece hücrelerin pasif olarak algılama bölgesinde hizalanması sağlanmış ve sonrasında empedans tabanlı ölçüm ile hücre tipi algılaması gerçekleştirilmiştir. Taşıyıcı sıvının özellikleri hem viskoelastik hizalama hem de empedans algılamayı başarılı kılabilecek şekilde optimize edilmiştir. Deneysel kırımları kan hücreleri ile beyaz kan hücrelerinin empedans sinyaline göre ayrıştırılabildiği görülmüştür. Bu çalışmada sunulan yenilikçi parçacık hizalayıcı sistem bir hücre sayma cihazı olmanın yanında, farklı tipte hücrelerin algılaması için de kullanılabilir bir akış tipi parçacık analiz yöntemidir.

Anahtar Kelimeler

“Mikroakışkan, hücre sayımı, empedans tabanlı algılama, viskoelastik hizalama”

1. Introduction

Flow through particle characterization systems can be primarily divided into two categories as optical and electrical systems (Yi et al. 2006; Holmes and Morgan 2010). For both types of systems a fundamental requirement is the alignment of the particles with the detection zone, either a focused optical signal or a concentrated electric field. Then, the interaction of the particle with this detection signal leads to sensing signal that is further processed and used for particle counting or particle characterization systems. For that purpose, the flow through particle characterization systems require a particle focusing mechanism. In the literature, the most commonly used particle focusing techniques are alignment by hydrodynamic focusing (Dziubinski 2012) and flow field fractionation (Wahlund 2013). Hydrodynamic focusing uses an auxiliary fluid to create a sheet flow of the fluid under investigation. The sample solution is squeezed by the auxiliary fluid and aligned with the sensing zone. Although this is a well-developed technique it requires multiple inlets and additional side flows which increases the instrumentation cost (Daniele et al. 2015). Flow field fractionation is a fairly straightforward technique and has no additional cost of implementation, however it requires a priori information about the particle size to be detected and is prone to clogging for clumped particles (Schauer 1995; Yamada and Seki 2006). In order to address these problems, viscoelastic focusing systems gained momentum in the last few years, where 3D particle focusing was achieved by the elastic lift force generated passively in a single fluid (Go, Byeon, and Lee 2017). Hence, viscoelastic focusing combines the precision and flexibility of hydrodynamic focusing and the simplicity of flow field fractionation. There exist excellent articles that summarize the theory of viscoelastic focusing (Romeo et al. 2013; Yuan et al. 2018; Lu et al. 2017; D'Avino, Greco, and Maffettone 2017).

In this work, viscoelastic focusing is utilized for detection of red blood cells and white blood cells using an impedimetric microfluidic detection system. The key question that is addressed is the applicability of viscoelastic focusing, hence viscoelastic fluids, for detection and differentiation of blood cells for impedimetric sensing. This has been an open question in the literature, since impedimetric detection is based on an electrical signal contrast between the particles and the particle carrying medium. Hence, for most studies the carrier medium was optimized to obtain a contrast between the medium and the particles to be detected. However, in the case of viscoelastic fluids there is limited control on the properties of the fluid. The fluid is optimized to obtain the rheological properties needed for the focusing performance. In this study, it is demonstrated that optimal solution properties can be obtained by joint effect of numerical and experimental work to simultaneously achieve viscoelastic focusing and impedimetric detection for differentiation of red blood cells and white blood cells. To the best of my knowledge, this is the first study that performs such an impedimetric differentiation using viscoelastic fluids.

2. Materials and Methods

In this section, the methodology and the materials used for the detection system is explained. Firstly, the details of the experimental setup is given (section 2.1) followed by the design of the microchannel and microelectrodes (section 2.2). Then, the optimization of the viscoelastic solution was given for both rheological performance (section 2.3) and cellular viability (section 2.4).

2.1. Impedimetric Detection Setup

The impedimetric cell detection system is composed of a high-end lock-in amplifier (Zurich Instruments, HF2LI), a trans-impedance amplifier (Zurich Instruments, HF2TA), a microchannel equipped with coplanar microelectrodes and a fluid pumping system (Elveflow OB1). For the initial flow characterization experiments, a microscope (Omano inverted) equipped with a camera (Phantom Miro) was used. An image of the experimental setup is given in Figure 1. The cells are suspended in a viscoelastic fluid and pumped through the microchannel using a pressure pump. The microchannel is composed of a single inlet and a single outlet and was fabricated by conventional PDMS (polydimethyl siloxane) soft lithography. The microchannel was bonded to a glass slide which has microfabricated gold electrodes manufactured using thermal evaporation of thin metal layers and lift-off. A three electrode design was used in this study, where the middle electrode provides the AC excitation signal generated by the lock-in amplifier with its built in signal generator. The two side electrodes were used as sensing and reference electrodes. By applying a differential measurement, the system rejected the drift that may potentially originate from electrode surface property or temperature changes over the course of the measurements.

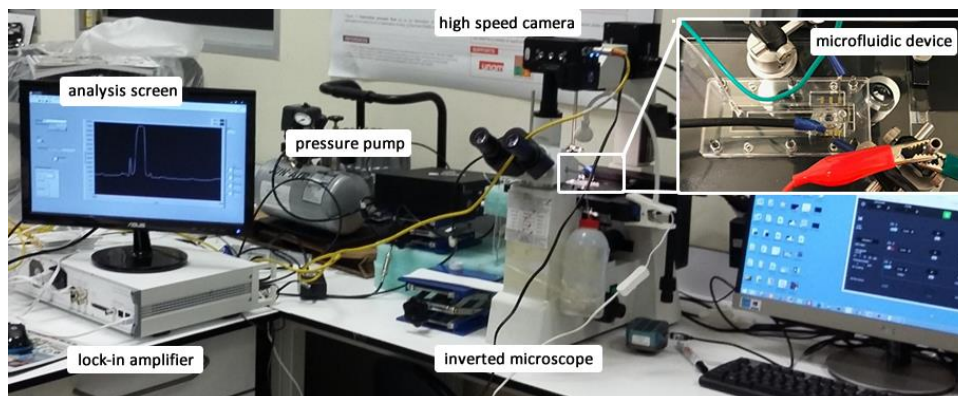


Figure 1. The photography of the experimental setup developed for microfluidic cell differentiation. The upper right inset image shows an enlarged top-view of the microfluidic device with electrical connections.

2.2. Finite Element Analysis for Electrode Design

A major step of the system design is determination of the channel dimensions (height, width, length) and the coplanar electrode dimensions (width and inter-electrode distance). In the literature although experimental approaches are common, numerical analysis tools provide a better insight and much shorter design cycle at this step. Hence, finite element analysis simulations (COMSOL 3.5) were performed to obtain the optimal channel and electrode dimensions. A snapshot of the 3D simulations is given in Figure 2. As seen, the particle under test was simulated as a spherical particle and the electric field generated by the coplanar electrodes are shown. As the particle is moved using a position sweep, the signal obtained from the measurement and the reference electrodes were obtained. The simulation was performed for varying channel and electrode dimensions. The results are given in section 3.2.

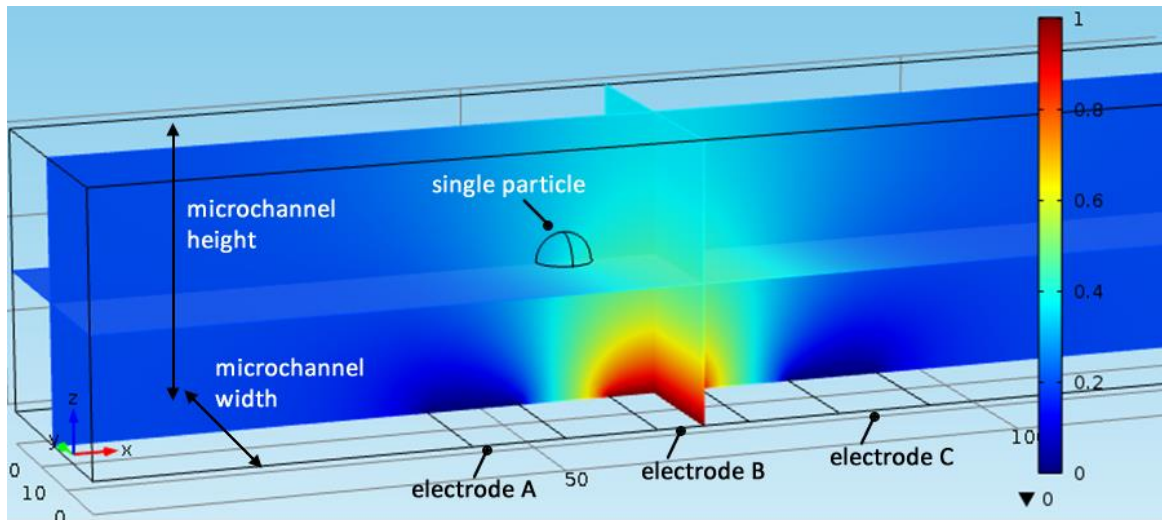


Figure 2. An image of the 3D finite element analysis measurements used for channel and electrode geometry optimization.

2.3. Solution Optimization for Rheological Performance

Then, the working solution was optimized to obtain rapid particle focusing at the center of the microchannel. Several polymeric solutions were used for viscoelastic focusing (Yuan et al. 2018). In this study, polyethylene oxide (PEO) was used due its low cost and availability in multiple molecular weights. First, the viscosity of PEO solutions with varying molecular weights were determined using a rheometer (Anton Paar MCR301). For these measurements the polymer was dissolved in deionized water at a concentration of 0.1% w/v. The results are given in Figure 3, where the measurement marks are the mean and the error bars represent 2 standard deviation of 5 repetitive measurements. Cone and plate (CP) measurement fixture (CP40-1) was used for the measurements. CP sample holder provides homogenous shear conditions due to constant shear rate with the conical gap. However hydrodynamic flow instabilities may also occur in CP fixtures as in the case for other fixtures (parallel plate, PP, and concentric cylinder, CC). For low viscosity fluids, secondary flow effects (centrifugal or inertial forces) may become dominant at high shear rates which disturbs the laminar flow conditions (Mezger 2014). In this study, the flow conditions were set so that the shear rate was kept between 100 and 1000 s⁻¹. As seen all four molecular weights provide almost constant viscosity, varying between 1 and 3 mPa.s as a function of polymer molecular weight. Hence in order to determine the polymer molecular weight, the focusing of particles were tested using red blood cell solutions. The 5 MDa solution provided the best performance by focusing the suspended cells at the center of the channel at a distance of 2 cm from the inlet at an inlet gauge pressure of 200 mbar. These observations were performed using high speed camera imaging, which was only used for initial observation and verification steps and eliminated during the following impedance analysis results.

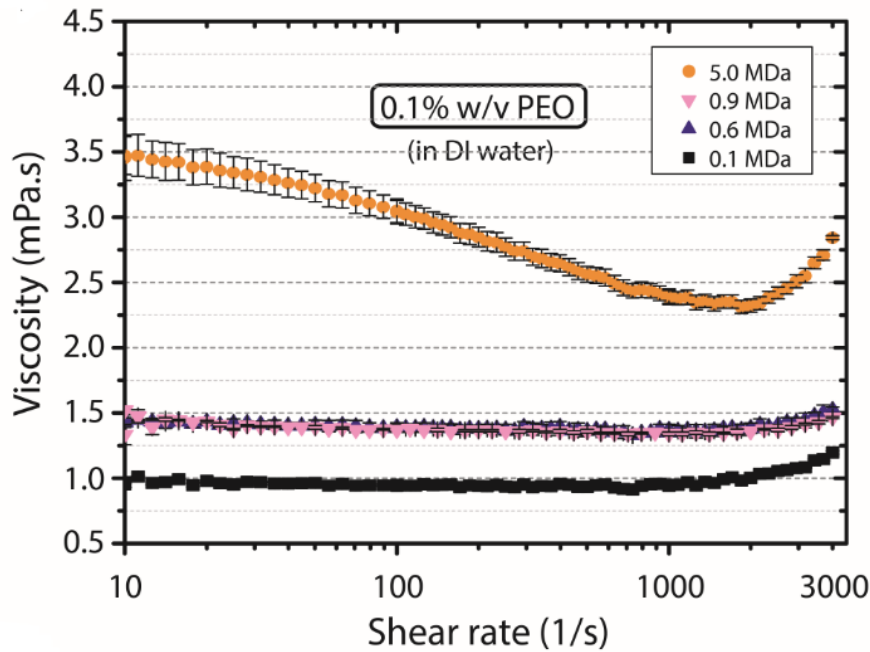


Figure 3. Viscosity measurements of 0.1% w/v polyethylene oxide (PEO) solutions of various molecular weights in a wide range of shear rate.

2.4. Solution Optimization for Cell Viability

The final step in the solution optimization was obtaining the conductivity that yields the highest signal for the impedimetric detection. It is well-known that higher ionic conductivity of the medium leads to an improved signal for cellular detection application, since cells have a lipid containing membrane that behave as insulator (Serhatlioglu et al. 2019). However, increasing the solution ionic concentration may have adverse effects on cell integrity. The 5MDa PEO was dissolved (0.1% w/v) in three different ionic concentrations of PBS. Then, the cells were suspended in these solutions and were imaged under optical microscope. As seen in Figure 4, cells preserve their shape in 1X PBS solution. However when they are suspended in 3X PBS solution the number of viable cells decreased considerably. Additionally, survived cells have compromised membranes and appeared as star-shaped which is an evidence of cell shrinkage. At 10X PBS most of the cells suffered lysis. Therefore, RBCs experiments cannot be performed with other PBS concentrations. A similar assay was performed for WBCs and it was concluded that for cell viability 1X PBS is the optimal solution.

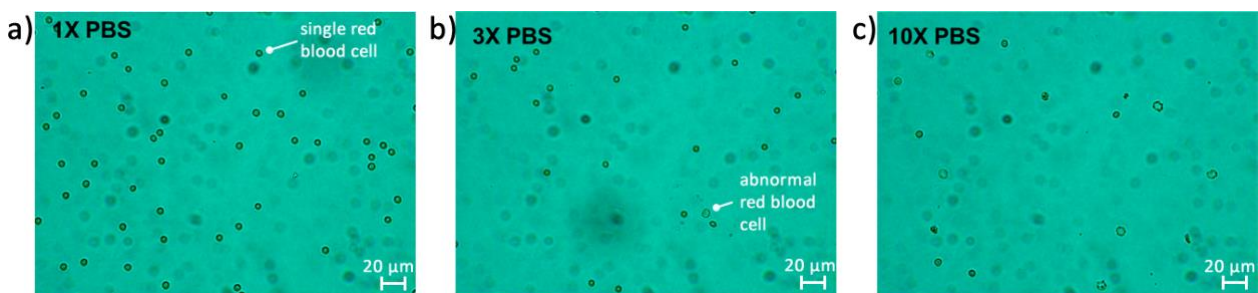


Figure 4. Optical microscope images of red blood cells suspended in varying concentrations of PBS solutions: a) 1X, b) 3X, c) 10X.

3. Numerical and Experimental Results

3.1. Numerical Results

The finite element modeling analysis explained in the previous section was used to determine the detection signal for a model spherical microparticle of 6 μm in diameter with cell-like material properties. As seen from the schematic of the overall measurement system given in Figure 5, the system detects the particle based on the electrical signal change due to the presence of the particle in the detection zone over the microelectrodes. A lock-in amplifier system was used for these measurements since very low currents are detected. Any noise other than the measurement frequency should be rejected to obtain a satisfactory signal to noise ratio.

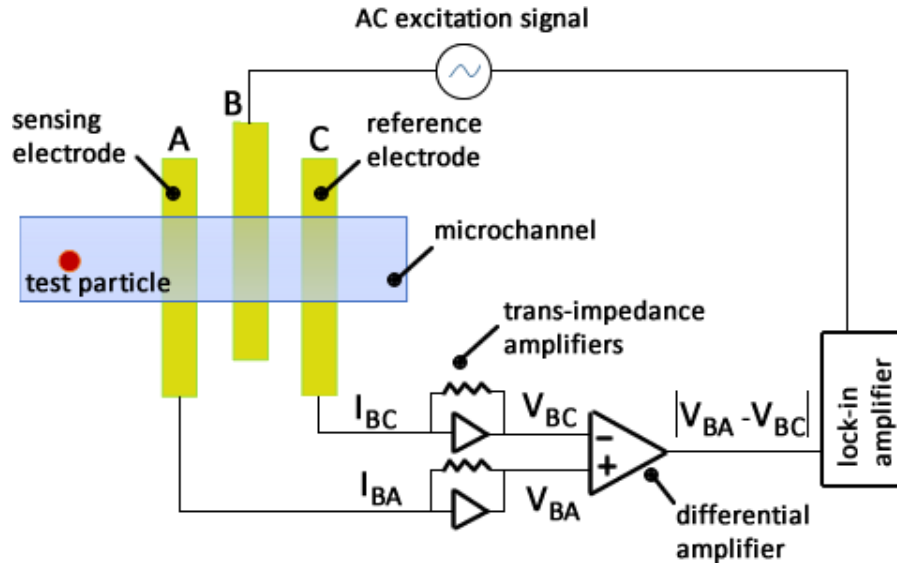


Figure 5. A schematic of the impedance measurement system demonstrated the top-view of the detection zone together with the read-out electronics: TA:trans-impedance amplifier, DA: differential voltage amplifier, LA: lock-in amplifier

The finite element model simulations were repeated for varying electrode and channel geometries and the signal measurement by the lock-in amplifier was calculated. Additionally, the measurement medium was also varied and the results for increasing ionic concentrations were obtained (given in Table 1) to demonstrate the importance of the PBS concentration. From these numerical results, the channel width and height were determined as $30\ \mu\text{m}$; and the electrode width and gap were set as $10\ \mu\text{m}$. Our results for these dimensions are given in Table 1. The detection signal that is given at the rightmost column ($V_{BC}-V_{BA}$) corresponds to the signal peak amplitude obtained when the particle is at the center-position between the first two electrodes (third column, I_{BC}). The blank signal value (in the second column) was subtracted from this value to calculate the detection signal. Although the detection signal increases with increasing solution conductivity, the experiments were performed with 1X PBS not to compromise the cell integrity as explained in detail in section 2.4.

Table 1. Simulation results for differential impedance measurements at varying ionic concentrations of PBS

PBS concentration	Z_{BA} or Z_{BC} ($\text{k}\Omega$)	I_{BC} or I_{BA} (μA)	I_{BC} (μA)	I_{BA} (μA)	$I_{BC}-I_{BA}$ (μA)	$Z_{BA}-Z_{BC}$ (Ω)	$V_{BC}-V_{BA}$ (mV)
1X PBS	34.847	57.39	57.26	57.39	0.13	133.94	0.13
3X PBS	11.616	172.18	171.78	172.18	0.40	44.64	0.40
10X PBS	3.4848	573.92	572.60	573.92	1.32	13.39	1.32

3.2. Experimental Results

After optimization of the channel, electrode geometry and the working liquid, the cell differentiation experiments were performed. The red blood cells (RBC) were obtained from a healthy voluntary donor. $20\ \mu\text{l}$ of finger-prick blood was obtained and mixed with anticoagulant. Then the blood sample was centrifuged at 5000 rpm for 3 min for RBC separation. $2\ \mu\text{l}$ of suspended RBCs were dispensed in 4 ml of the viscoelastic solution optimized in the previous steps. The solution was used as fresh to prevent any bias due to cell deformation over time.

Since the number of white blood cells (WBCs) are significantly lower compared to RBCs, a cell line was used to test the performance of the system for WBCs by having much higher cell concentration. For that purpose mononuclear B lymphoblastic CCRF-SB leukaemia cell line (ATCC® CCL-120™) was acquired. The leukaemia cells (WBCs) were grown in cell culture flasks in a humidified environment (95% air, 5% CO_2). The cells were grown in suspension cultures in RPMI complete medium (88% RPMI 1640 medium, 10% fetal bovine serum with %1 Pen-Strep and %1 glutamate) and sub-cultured every 3-4 days when they reach confluency. Confluent cells were centrifuged at 2500 g for 5 min, then re-suspended in the viscoelastic PEO solution (5MDa, 500 ppm). The cells were diluted to a final density of 106 cells/ml.

Finally the RBC and WBC cell suspension were pumped at three different pressure rates (150, 250, and 410 mbar) through the impedance-based viscoelastic cytometry device. A representative signal from a single experiment (RBC solution at 250 mbar inlet pressure) is given in Figure 6a to demonstrate the electrical signals obtained from individual cells. As seen, each cell yields a positive and a negative peak due to the differential measurement. Individual signals corresponding to a single cell are given as close-up view. A characteristic signal can be derived from these measurements and signal amplitude and transit time can be defined for each cell as also shown in the Figure 6b. Each of these signals was analyzed to obtain the transit time, which is the time between the signal maxima and minima, as well as the signal amplitude maximum were obtained using a custom Matlab script. The results for two cell populations are given in Figure 7.

Leukemia cells are B lymphoblast white blood cell type and normally their size are larger than RBCs. Figure 7a demonstrates a clear difference in transit time for equal inlet pressures for signals between RBCs and WBCs. Mean values of transit time of WBCs are almost two times larger than RBCs. Additionally, the coefficient of variation (CV%) values of WBCs are larger in comparison to RBCs due to the larger size variations in the WBC population, which was also verified by optical microscopy investigation. In Figure 7b, WBCs' signal amplitude mean values are almost three times larger than RBCs, however, WBC populations interlaced with RBC populations for each inlet pressure values. Also, WBC CV% values of peak amplitudes are larger than that of RBCs, which is an evidence to the large size of WBCs. The measurements were obtained at a single measurement frequency of 2 MHz and demonstrate that by analyzing the transit time and peak amplitude collectively it is possible to differentiate viscoelastically focused WBCs and RBCs impedimetrically.

These results are very promising in the sense that viscoelastic focusing is very successful in aligning the cells at the center of the channel so that a high-quality, i.e. low CV%, impedence detection was achieved for cell differentiation. Once the differentiation of thrombocytes is achieved, these results will pave the way for a whole blood analysis system that is based on microfluidic viscoelastic focusing and impedence detection.

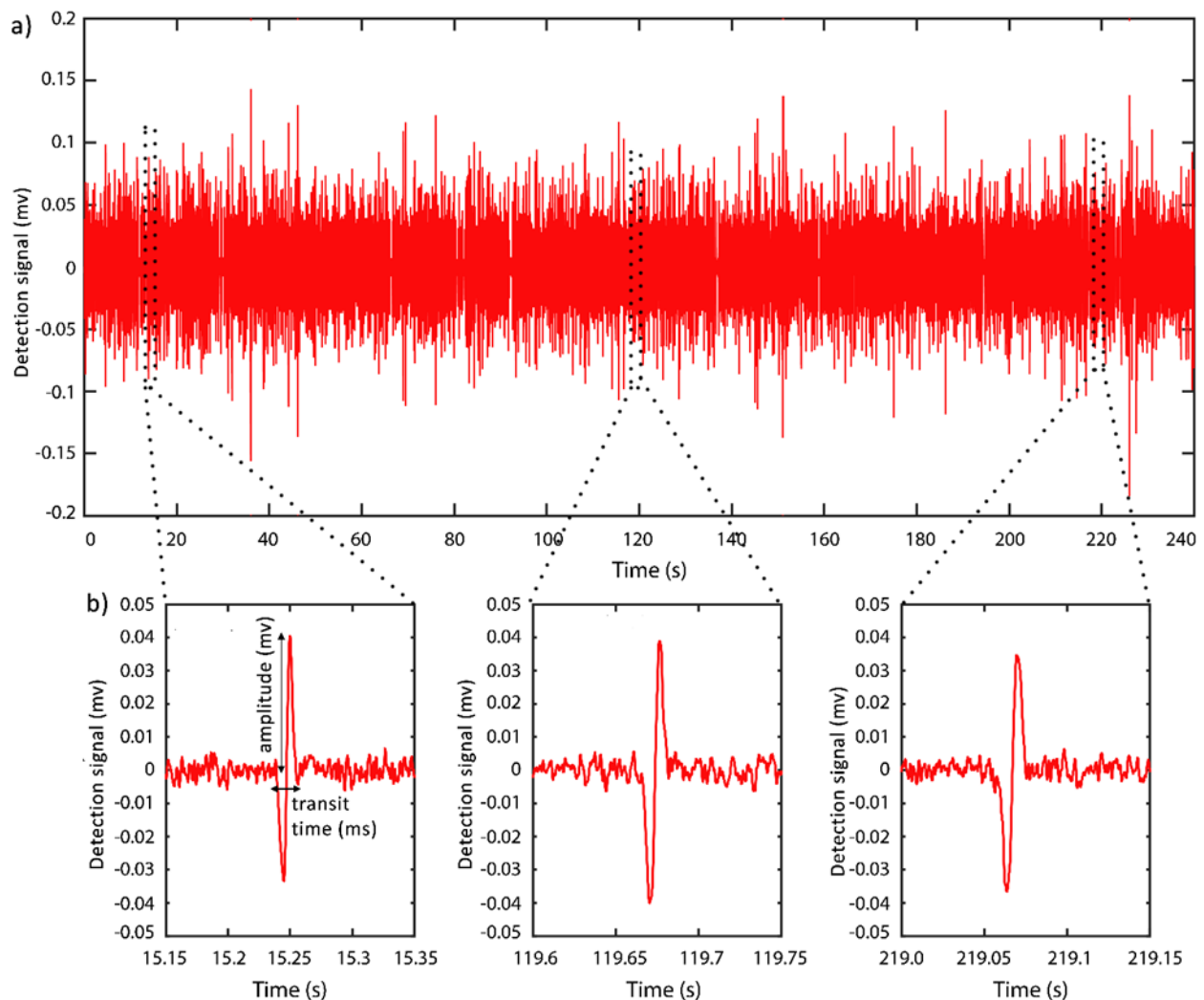


Figure 6. (a) The lock-in amplifier signal output recorded for a portion of the experiments where the signals represent individual cells detected by the impedimetric measurement (inlet pressure of 250 mbar). (b) shows a close-up view of individual signals obtained from single cells with two characteristic peaks. The analysis parameters were defined on this characteristic signal as amplitude (mV) and transit time (ms)

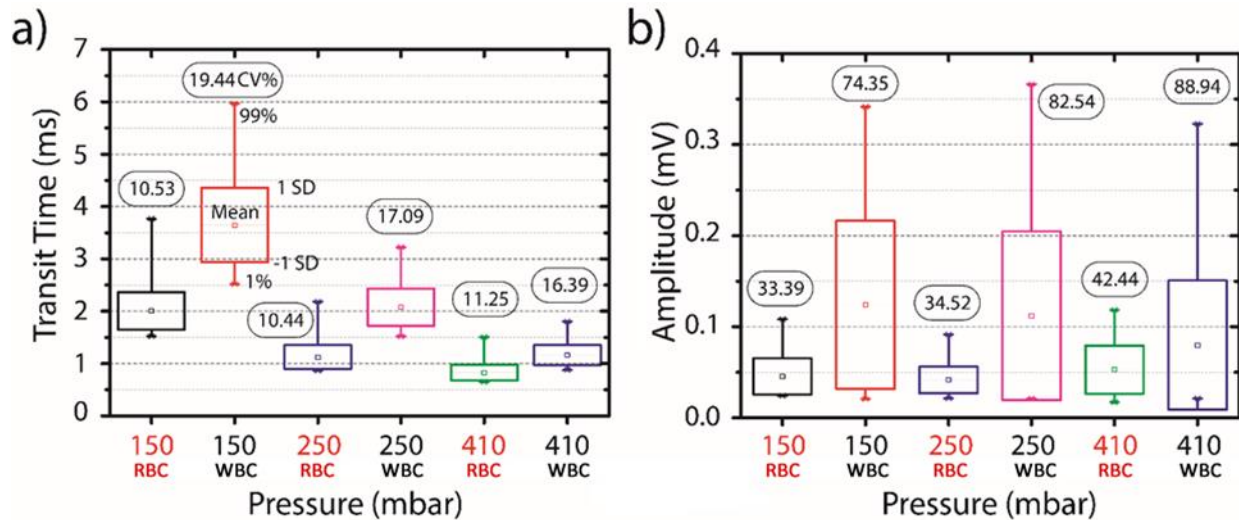


Figure 1. The results of the impedance signal measurement analysis for RBC and WBC solutions analyzed at three different inlet pressures (150, 250 and 400 mbar); (a) transit time and (b) peak amplitude, for the comparison of RBC and WBC results. For each bar chart, the small square represents the mean value, the box represents the standard deviation, and the whisker lines represent the 99% and 1% population of the counted events. CV% values are given on the top of each bar line.

4. Conclusion

The impedimetric identification of RBC and WBCs were achieved using a polyethylene oxide based viscoelastic focusing. It was shown that by careful design of the solution properties both the rheological and the electrical properties of the carrying solution can be tuned so that successful cell alignment and identification can be achieved. In case of the blood cells, the primary difference came from the transit time which is an indication of the cell size. When we run the system with 250 mbar of inlet pressure, a doubling of transit time was achieved which allows clear distinguishing of cell types. Although the two cell types that were analyzed have irregular cell shapes, their identification was possible by successfully aligning them at the sensing spot using viscoelastic solution. This study can pave the way towards a new generation of flow through cytometry and cell characterization systems that do not require additional design components or inlet flows for particle focusing.

Acknowledgements

The author acknowledges support from Dr. Kutay Icoz and Murat Serhatlioglu for biological experiments. The detection system was acquired by financial support (project no. 215E086) from the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK).

Referanslar

- D'Avino, Gaetano, Francesco Greco, & Pier Luca Maffettone. (2017). Particle Migration Due to Viscoelasticity of the Suspending Liquid and Its Relevance in Microfluidic Devices. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 49(1), 341–60.
- Daniele, Michael A., Darryl A. Boyd, David R. Mott, & Frances S. Ligler. (2015). 3D Hydrodynamic Focusing Microfluidics for Emerging Sensing Technologies. *Biosensors and Bioelectronics*, 67, 25–34.
- Dziubinski, M. (2012). Hydrodynamic Focusing in Microfluidic Devices. In *Advances in Microfluidics*. InTech.
- Go, Taesik, Hyeokjun Byeon, & Sang Joon Lee. (2017). Focusing and Alignment of Erythrocytes in a Viscoelastic Medium. *Scientific Reports*, 7. Nature Publishing Group: 41162.
- Holmes, David, & Hywel Morgan. (2010). Single Cell Impedance Cytometry for Identification and Counting of CD4 T-Cells in Human Blood Using Impedance Labels. *Analytical Chemistry*, 82(4), 1455–61.
- Lu, Xinyu, Chao Liu, Guoqing Hu, & Xiangchun Xuan. (2017). Particle Manipulations in Non-Newtonian Microfluidics: A Review. *Journal of Colloid and Interface Science* 500 (August). Academic Press: 182–201.
- Mezger, T.G. 2014. *The Rheology Handbook*. Vincentz Network, 4th edition
- Romeo, Giovanni, Gaetano D'Avino, Francesco Greco, Paolo A. Netti, & Pier Luca Maffettone. (2013). Viscoelastic Flow-Focusing in Microchannels: Scaling Properties of the Particle Radial Distributions. *Lab on a Chip*, 13(14), 2802.

- Schauer, Thadeus. (1995). Symmetrical and Asymmetrical Flow Field-Flow Fractionation for Particle Size Determination. *Particle & Particle Systems Characterization*, 12(6), 284–88.
- Serhatlioglu, Murat, Mohammad Asghari, Mustafa Tahsin Guler, & Caglar Elbuken. (2019). Impedance-Based Viscoelastic Flow Cytometry. *Electrophoresis*, 40(6), 906-913.
- Wahlund, Karl-Gustav. (2013). Flow Field-Flow Fractionation: Critical Overview. *Journal of Chromatography A*, 1287, 97–112.
- Yamada, Masumi, & Minoru Seki. (2006). Microfluidic Particle Sorter Employing Flow Splitting and Recombining. *Anal. Chem*, 78(4), 1357–62.
- Yi, Changqing, Qi Zhang, Cheuk-Wing Li, Jun Yang, Jianlong Zhao, & Mengsu Yang. (2006). Optical and Electrochemical Detection Techniques for Cell-Based Microfluidic Systems. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 384(6), 1259–68.
- Yuan, Dan, Qianbin Zhao, Sheng Yan, Shi-Yang Tang, Gursel Alici, Jun Zhang, & Weihua Li. (2018). Recent Progress of Particle Migration in Viscoelastic Fluids. *Lab on a Chip*, 18, 551.



750 V DC Beslemeli Bir Demiryolu Cer Merkezinde Güç Kalitesi Probleminin UVDGM Bazlı DSTATKOM İle Çözülmesi

Solving Power Quality Problem of 750 V DC Railway Substation With DSTATCOM Using SVPWM

Mehmet Taciddin Akçay¹ , İlhan Kocaarslan² 

¹ İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Raylı Sistem Daire Başkanlığı, İstanbul, TÜRKİYE

² TUVASAŞ, Türkiye Vagon Sanayii, 54100 Adapazarı, Sakarya, TÜRKİYE.

Başvuru/Received: 26/02/2019

Kabul/Accepted: 18/04/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı çok önemlidir. Tek fazlı ve çok fazlı elektrik sistemlerinde oluşabilecek herhangi bir arıza durumu ya da gerilim düzensizliğine neden olabilecek başka bir durum güç kalitesini olumsuz etkilemektedir. Demiryollarında gerilim kararlılığı işletme sürekliliğinin sağlanması açısından kritiktir. DC beslemeli raylı sistemlerde, DC gerilim trafo merkezlerinde bulunan AC şebeke geriliminden elde edildiği için AC bölümde oluşabilecek herhangi bir olumsuz durum DC gerilimi de etkilemektedir. Bu çalışmada 750 V DC beslemeli bir demiryolu hattında oluşabilecek güç kalitesi probleminin UVDGM (Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu) bazlı Dstatkom (Dağıtım Sistemi Statik Senkron Kompanzator) ile çözülmesi araştırılmıştır. Çalışma için trafo merkezinde oluşabilecek arıza durumunun benzetimi yapılarak gerilim düzensizliği problemi Dstatkom ile ortadan kaldırılmıştır. Benzetim sonuçları ile ilgili olarak AC ve DC gerilimlere ait analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilerek sağlanan iyileştirme durumu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler

“*Cer, DC, Demiryolu, Güç, UVDGM*”

Abstract

Voltage stability in power systems is critical. The fault or any case cause voltage instability that may occur in three-phase and single-phase electrical power systems emerge power quality problems. Voltage stability in railways is important because of the operation continuity. The fault that occur in the AC part of the system may affect also DC voltage due to the usage of the AC grid for the generation of the DC voltage in substations. In this study, solving power quality problem of 750 V DC railway substation with Dstatcom (Distribution Static Synchronous Compensator) using SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) is investigated. The fault that may occur in the substation is simulated and the voltage stability problem is eliminated with Dstatcom. Comparative analyzes results are given for the AC and DC voltage about the simulation findings and the improvement of the system is revealed.

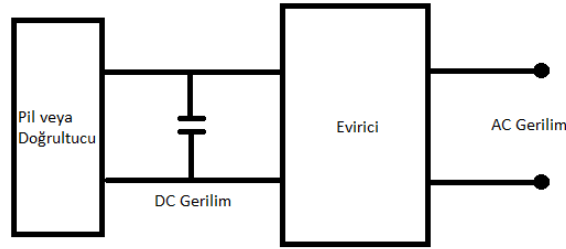
Key Words

“*DC, Power, Railway, SVPWM, Traction*”

1. Giriş

Elektrik iletim sisteminin en temel fonksiyonu tüketicie ve ilgili ekipmanlara iletilen gerilimin sinusoidal bir şekilde olmasıdır. Ekipmanların sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için bu gerilimin belirli limitler içerisinde kalması gerekmektedir. Demiryollarında işletme anında sürekliliğin sağlanabilmesi ve herhangi bir arıza ya da kesinti durumu yaşanmaması açısından gerilim kararlılığı çok önemlidir. Demiryollarında sağlanması gereken gerilim seviyeleri EN 50163 standardında tarif edilmiştir. DC beslemeli demiryollarında aracın ihtiyacı olan DC gerilim cer merkezlerinde şebekeden temin edilen AC gerilim ile sağlanmaktadır. Bu nedenle AC bölümde meydana gelebilecek herhangi bir olumsuz durum DC sistemle beslenen tüm ekipmanları da etkilemektedir. 750 V DC ile beslenen demiryollarında 34.5 kV AC şebeke besleme gerilimi cer merkezlerinde bulunan transformatörler yardımıyla 12.2 kV AC gerilime dönüştürülmektedir.

UVDGM yöntemi dijital uygulama kolaylığı ve efektif DC bara kullanımından ötürü diğer yöntemlere kıyasla tercih edilmektedir (Khan, 2015). Bu yöntem gerçek zamanlı modülasyon yöntemlerinden biri olup eviricide istenen genlikte ve frekansta üç faz gerilimler elde edilebilmektedir (Saygın & Kerem, 2017). Dstatkom elektrik iletim ve dağıtım güç sistemlerine paralel bağlanabilen ve reaktif enerji problemleriyle enerji kalitesi problemlerinde kullanılan ekipmanlardır (Ertay vd., 2016). 5 Seviyeli kaskat H-köprü eviricili uygulamalar statkom bazlı uygulamalarda güç kalitesini artırmak için kullanılmaktadır (Venkatesh vd., 2017). Güç kalitesi probleminin temelini gerilim ve akım düzensizlikleri oluşturmaktadır (Chang vd., 2009). Güç kalitesi problemlerinden biri de şebekeye bağlanan lineer olmayan yüklerdir (Jadeja vd., 2016). DGM bazlı çok seviyeli eviriciler ile kontrol AC dalga formunda bulunan harmoniklerin azaltılmasında kullanılan verimli bir yöntemdir (Balamurugan vd., 2016). UVDGM'nin temel prensibi güç sisteminde DC baraya bağlı gerilim kaynaklı evirici ile kontrol edilebilen AC gerilimin üretilmesidir (Murali vd., 2017).. UVDGM yönteminde minimum DC gerilim maksimum hat gerilimine göre belirlenir (Chen, 2016). Çok seviyeli DGM yöntemlerinde birden fazla taşıyıcı dalga kullanılabilir (Galvan, 2006). Çok taşıyıcı DGM kapasitör geriliminin daha kararlı olmasını sağlamaktadır (Anish vd., 2012). UVDGM yöntemi anahtarlama kayıplarını azaltmak için kullanılmaktadır (Giridharan vd., 2011). UVDGM metodunda endüstriyel uygulamalar için çeşitli evirici çıkış voltajları tercih edilebilmektedir (Ananth vd., 2012).



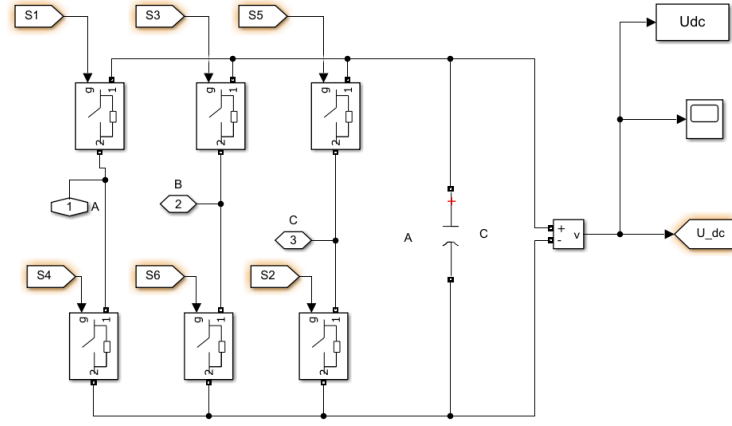
Şekil 1. Evirici Sistemine Ait Şematik Çizim (Ananth vd., 2012).

Dstatkom kaynağa paralel bağlı, dağıtım sistemleri için voltaj düzenlemesi, güç faktörünün iyileştirilmesi, yükün dengelenmesi ile harmoniklerin kompanze edilmesi için kullanılan evirici bazlı bir ekipmandır (Deniz vd., 2011). Son yıllarda bu cihazlar dağınık güç üretim sistemlerinde ve yenilenebilir enerji uygulamalarında anahtar bir çözüm haline gelmiştir. Statkom reaktif gücü kontrol etmek için de kullanılmaktadır (Salem vd., 2017), (Iswariya vd., 2015).

Bu çalışmada 750 V DC beslemeli bir demiryolu hattında oluşabilecek güç kalitesi probleminin UVDGM bazlı Dstatkom ile çözülmesi matlab/simulink yardımıyla yapılmıştır. Benzetim sonuçları grafiklerle verilerek sonuçlar karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır. Benzetimle ilgili iyileştirme durumu sonuçlarla ortaya konulmuştur.

2. Materyal ve Metot

Dstatkom kaynakla aynı frekansta reaktif güç alıp gönderebilen kaynakla ortak bağlantısı olan güç ekipmanıdır. Dstatkom güç devresinde bir evirici, akımları filtreleyen bir aygıt ve DC voltaj için kondansatörler bulunmaktadır. Gerilim tabanlı eviricilerinde kullanılan uzay vektör modülasyon yönteminde, evirici tarafından üretilen üç faz gerilimler α - β düzleminde referans uzay gerilimler olarak üretilerek hesaplamalar yapılmaktadır. Şekil 2'de üç fazlı altı anahtarlı eviriciye ait devre gösterilmektedir.



Şekil 2. Altı Anahtarlı Üç Fazlı Evirici Devresi

UVDGM yönteminde üç faz gerilimlere ait anlık değerler kullanılarak uzay vektörlerin genliği ve faz açısı hesaplanmaktadır.

Üç fazlı evirici çıkış voltajına ait uzay vektörüne ait denklem (1) ile verilmektedir. V_s kaynak gerilimini, V_a , V_b , V_c ise üç faza ait gerilimleri ifade etmektedir.

$$\bar{V}_s^* = \frac{2}{3}(V_a + \bar{a}V_b + \bar{a}^2V_c) \quad (1)$$

\bar{a} ifadesi (2) ile gösterilmektedir. Uzay vektörü sayesinde üç faz sistemler eşzamanlı olarak gösterilebilmektedir [8].

$$\bar{a} = e^{(j\frac{2\pi}{3})} \quad (2)$$

Her bir faza ait faz-nötr gerilimlerine ait açılımlar ise (3), (4) ve (5) ile verilmektedir. Yıldız noktası n ile ifade edilmiştir.

$$V_A = V_a + V_{nN} \quad (3)$$

$$V_B = V_b + V_{nN} \quad (4)$$

$$V_C = V_c + V_{nN} \quad (5)$$

(3), (4) ve (5) ifadelerinden (6) eşitliği elde edilmektedir.

$$V_{nN} = \left(\frac{1}{3}\right)(V_A + V_B + V_C) \quad (6)$$

Üç faza ait gerilimlerin uzay vektörleri biçiminde ifadesi ise (7) ile verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

Statkom çalışma durumunda AC akımın genliği (8) ile gösterilmektedir.

$$I = (V_0 - V)/X \quad (8)$$

X transformatörün kaçak reaktansını ifade etmektedir. Statkom tarafından üretilen reaktif güç ise (9) ile verilmektedir.

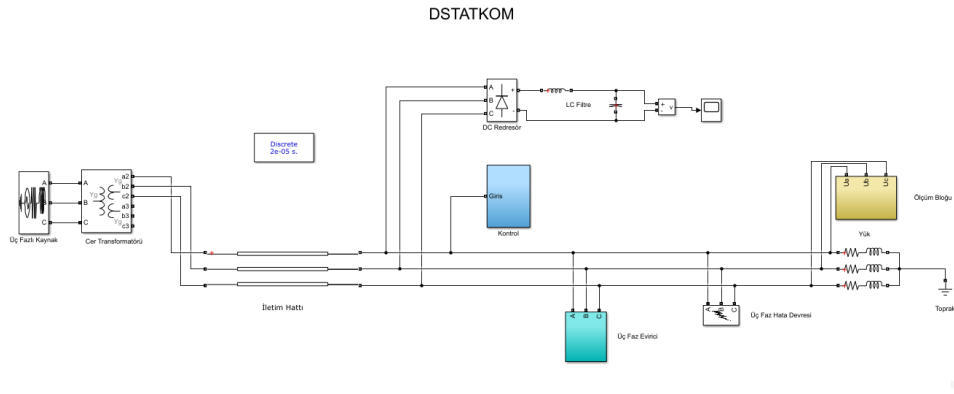
$$Q = \frac{V}{X}(V - V_0 \cos \varphi) \quad (9)$$

Statkom'daki aktif gücün giriş-çıkışı eviricinin çıkışındaki voltajın AC kaynak voltajına göre fazın kaydırılması ile kontrol edilir [3]. Aktif güç denklemi (10) ile verilmektedir.

$$P = \frac{VV_0 \sin \alpha}{X} \quad (10)$$

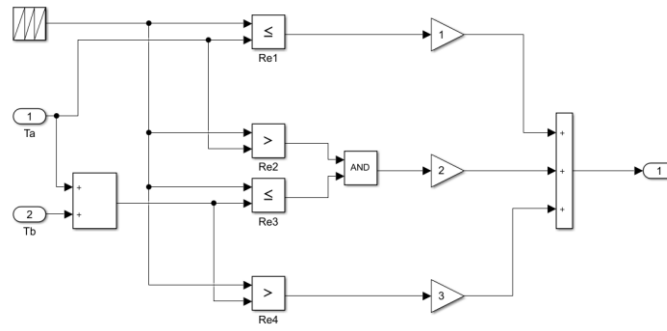
3. Bulgular

Bu çalışmada UVDGM bazlı Dstatkom benzetimi yapılmıştır. Şehir içi raylı sistem hatlarında genellikle 750 V DC ve 1500 V DC besleme gerilimleri tercih edilmektedir. Benzetim için 750 V DC beslemeli bir demiryoluna ait cer merkezinden yararlanılmıştır. Şekil 3'de benzetim için kullanılan devreye ait modelleme gösterilmektedir.



Şekil 3. Dstatkom Devre Modeli

Benzetim için 33 kV kaynak gerilimi, cer merkezi için 33 kV/0.6 kV cer transformatörü, iletim hattı, DC gerilimin elde edildiği redresör sistemi, üç faz hata devresi, yük devresi, UVDGM sistemi için kontrol bloğu ve ölçüm blokları kullanılmıştır. Anahtarlama frekansı 3 kHz seçilmiştir. Şekil 4 ile tetikleme sinyallerinin üretildiği bölüm verilmektedir.



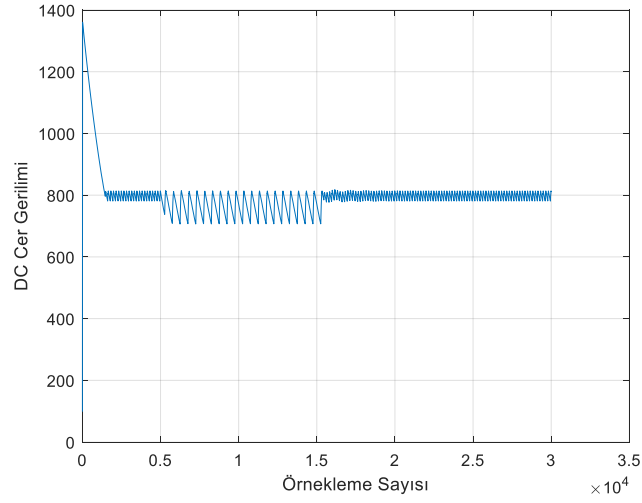
Şekil 4. Tetikleme Sinyallerinin Üretilmesi

UVDGM yöntemi için referans sinyaller bu kısımda üretilmektedir. Benzetim için örnekleme sayısı daha etkili bir sonuç almak için $3e4$ seçilmiştir. Tablo 1'de cer merkezi için önerilen statkom'a ait tasarım parametreleri verilmektedir.

Tablo 1. Cer Merkezi İçin Statkom Parametreleri

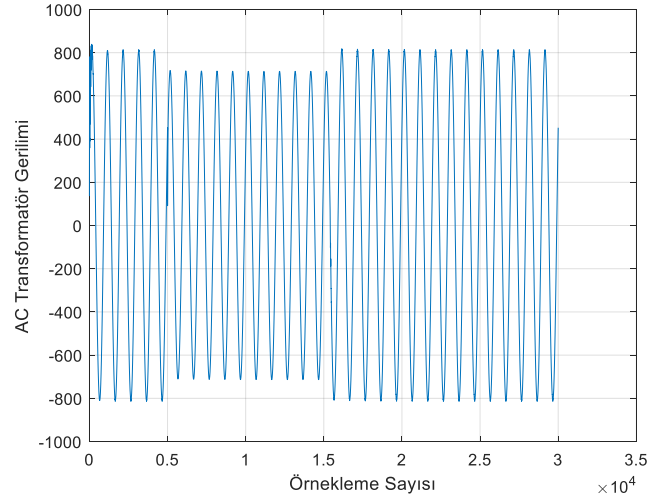
Parametre	Değer
Kaynak Gerilimi V_k	33 kV V_{rms} Faz-Faz
Kaynak Frekansı	50 Hz
Kaynak Empedansı (R_k, L_k)	1e-1 Ω 7.6e-1 H
Yük Empedansı (R_y, L_y)	5e-1 Ω 6.25e-2 H
Üç Faz Hata Direnci (R_h)	10 Ω
Statkom Anahtarlama Frekansı	3 kHz
Statkom Histerizis Bant Aralığı	2 V
Cer Transformatörü Çevirme Oranı	55
Redresör Filtresi (L_f, C_f)	1e-4 H 0.8e-6 F

Cer merkezinde gerçekleşecek bir üç faz hata olayında statkom kullanıldığı durum ve kullanılmadığı durumlar ayrı ayrı analiz edilerek DC besleme gerilimi ve AC transformatör çıkış gerilimlerinin değişimi incelenmiştir. Şekil 5 ve şekil 6 ile statkomsuz durumlara ait gerilim grafikleri verilmiştir.



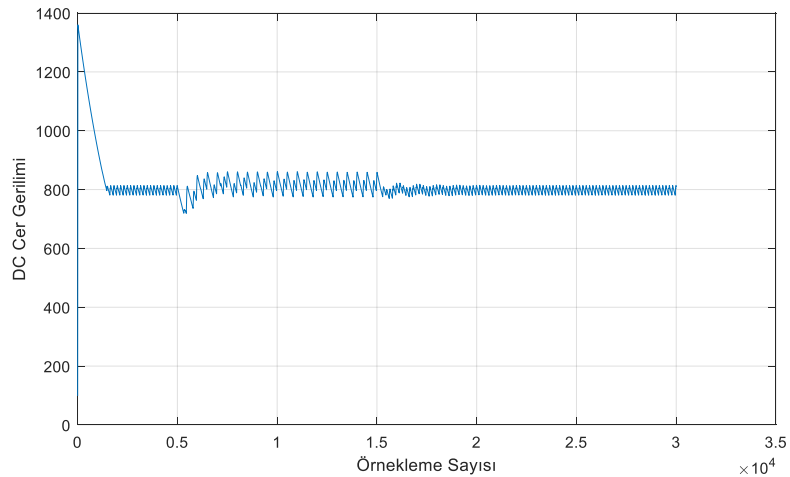
Şekil 5. Cer Merkezi DC Besleme Gerilimi (Statkomsuz)

Grafikte görüldüğü üzere hata durumunda DC gerilim 750 V seviyelerine kadar düşmüştür. Üç faz hata durumu 0.1-0.3 saniyeleri arasında gerçekleşmektedir. Bu gerilim değeri cer besleme merkezinin boşa gerilimine ait değer olduğu için raylı 624system işletmesini olumsuz etkileyecek bir durumdur.



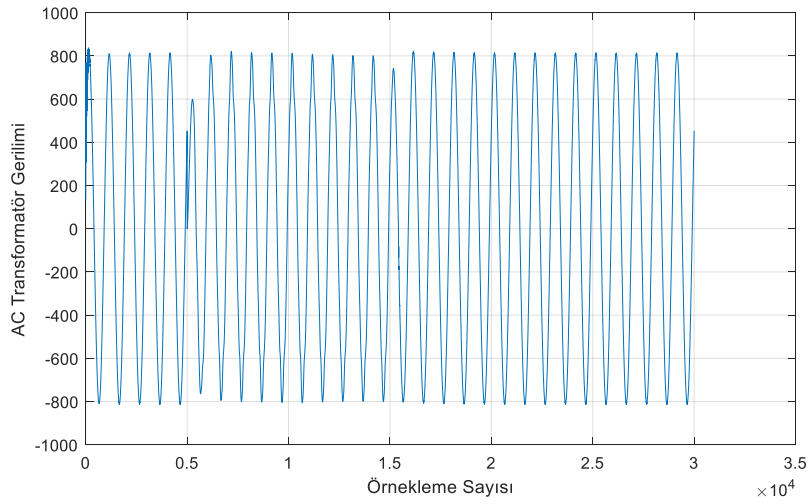
Şekil 6. AC Transformatör Çıkış Gerilimi (Statkomsuz)

Bu durumda transformatör çıkış gerilimindeki azalma iki kutup için de 100 V civarında olmaktadır. Bu durum hata süresince devam etmektedir. Şekilde görüldüğü üzere hata durumunda gerilim düzensizliği durumu ortaya çıkmıştır. Şekil 7 ile şekil 8'de statkomlu durumlara ait gerilimlerin değişimi verilmiştir.



Şekil 7. Cer Merkezi DC Besleme Gerilimi (Statkomlu)

Statkom kullanıldığı zaman ise şekilde görüldüğü üzere cer merkezinin boşa gerilimi 810 V civarında nominal değerinde seyir etmektedir. Bu durumda hatanın meydana getirdiği gerilim düşüşünün ortadan kaldırıldığı görülmektedir.



Şekil 8. AC Transformator Çıkış Gerilimi (Statkomlu)

Şekilde görüldüğü üzere statkom kullanıldığı durumda herhangi bir gerilim düzensizliği yaşanmamış olup gerilim nominal tepe değeri olan 800 V değerini almıştır. Statkom ile hata durumunda yaşanan gerilim düzensizliği problemi ortadan kaldırılmıştır. Tablo 2’de statkomlu ve statkomsuz durumlara ait gerilim bilgileri özet tablo ile verilmektedir.

Tablo 2. Statkomlu ve Statkomsuz Durumlara Ait Özet Durum

Ölçüm Noktaları (Hata Esnasında)	Statkomun Bağlı Olmadığı Durumda Gerilimler	Statkomun Bağlı Olduğu Durumda Gerilimler
Cer Merkezi DC Gerilimi	750 V DC	810 V DC
AC Transformator Tepe Gerilimi	700 V AC	800 V AC

Statkom kullanıldığı durumda gerçekleşen iyileşme bu tabloda net bir şekilde görülmektedir. İşletme sürekliliği ve performansı için cer merkezinde boşa gerilimin nominal değerinde olması gerekmektedir. EN 50163’e göre 750 V DC beslemeli bir raylı sistem hattı için sürekli gerilim aralığı 500 V ile 900 V arasında değişmekte olup nominal gerilim 750 V olarak kabul edilmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada 750 V DC beslemeli bir demiryolu cer merkezinin güç kalitesi probleminin UVDGM Dstatkom ile çözülmesi araştırılmıştır. Tüm Sistem benzetim yoluyla modellenerek bu durum anlatılmaya çalışılmıştır. Çalışma kapsamında trafo merkezinde oluşabilecek arıza durumunun benzetimi yapılarak gerilim düzensizliği problemi Dstatkom ile ortadan kaldırılmıştır. Benzetim çalışmalarıyla ilgili olarak cer merkezi çıkış gerilimlerine ait sonuçlar karşılaştırmalı olarak yorumlanarak iyileştirme durumu ortaya konulmuştur. Statkom kullanılmadığı durumda cer merkezi DC besleme gerilimi 750 V DC olurken sisteme statkom bağlandığında bu değer nominal değerine ulaşarak 810 V DC değerini almaktadır. AC bölümde de benzer durum görülmekte olup sisteme statkom bağlanmadığı durumda transformator tepe gerilimi 700 V AC değerini almaktadır. Statkom bağlandığında ise bu değer 800 V AC değerini almaktadır. Statkomlu durumda hatadan kaynaklanan gerilim düzensizliğinin engellendiği görülmektedir.

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı ekipmanların ve tüm sistemlerin performansı için çok kritiktir. Tek fazlı ve çok fazlı elektrik sistemlerindeki hata durumu ve gerilim düzensizliğine neden oluşturacak farklı durumlar güç kalitesini olumsuz etkilemektedir. Demiryollarında işletme sürekliliği esas olduğu için gerilim kararlılığı hayati bir konuma sahiptir. Bu nedenle cer beslemesinin sağlandığı besleme merkezlerinde böyle bir durumun yaşanması durumunda alınması gereken tedbirler özenle çalışılarak sisteme uygun çözümlerin sağlanması gerekmektedir.

Referanslar

Ananth, D., V., Kumar, Y., N., Tilak, B., B., G., Raghunath, P., S. (2012). Multi-level Inverters and its Application of Statcom Using Svpwm and Spwm Techniques. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2012, 5, 30-38.

- Anish, P., S., Ramarajan, T., Srinivas, T., A., Sasikumar, M. (2012). Voltage Balancing in SVM Controlled Diode Clamped Multilevel Inverter for Adjustable drives. *International Journal of Soft Computing and Engineering*, 1, 2231-2307.
- Balamurugan, C., R., Natarajan, S., P., Bensraj, R., Shanthi, B. (2016). A Review on Modulation Strategies of Multi Level Inverter. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 3, 681-705.
- Chang, W., N., Yeh, K., D. (2009). Design And Implementation of Dstatcom For Fast Load Compensation of Unbalanced Loads. *Journal of Marine Science and Technology*, 4, 257-263.
- Chen, R. (2016). DC Capacitor Minimization of Single Phase Power Conversion And Applications. Phd, Michigan State University, Michigan, USA.
- Deniz, E., Coteli, R., Tuncer, S., Dandıl, B., Gencoglu, M., T. (2011). Uzay Vektör PWM Anahtarlama Üç-Seviyeli H-Köprü İverter Tabanlı D-STATKOM. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May, Elazığ, Turkey.
- Ertay, M., M., Dijle, M., Yücedağ, İ. (2016). Dinamik kompanzasyon cihazlarında kullanılan evirici yapıları: STATCOM ve DSTATCOM topolojileri. *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 2, 265-279.
- Galvan, J., I., L. (2006). Multilevel Converters: Topologies, Modelling, Space Vector Modulation Techniques and Optimisations. Phd, University of Seville, Seville, Spain.
- Giridharan, K., Chitra, A., Chellamuthu, C. (2011). Development of diode clamped inverter based STATCOM using SVPWM technique. *Giridharan et al./ Elixir Elec. Eng.*, 38, 4343-4347.
- Iswariya, T., Vennila, V. (2015). Design and Implementation of a Statcom for Railway Applications. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 10, 137-142.
- Jadeja, R., Patel, S., Chauhan, S., K. (2016). STATCOM – A Preface to Power Quality in Power Systems Performance. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 1, 895-905
- Khan, M., A. (2015). Comprehensive Analysis of Discontinuous Space Vector PWM Techniques for a Five-Phase Voltage Source Inverter. *International Journal of Research Studies in Electrical and Electronics Engineering (IJRSEEE)*, 2, 1-17.
- Murali, C., H., Chandar, Y., B., Mothiram, B., Suresh, E. (2017). D-Statcom Using Space Vector Pulse Width Modulation Technique. *Journal of Advanced Research in Dynamical & Control Systems*, 11, 471-479.
- Saygın, A., Kerem, A. (2017). 6-Anahtarlı 3-Seviyeli Eviricide Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon Tekniğinin Uygulaması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5, 565-581.
- Salem, M., Hamouda, M., Slama, J., B., H. (2017). Comparative Study of Conventional Modulation Schemes in Terms of Conducted And Radiated EMI Generated by Three-Phase Inverters. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25, 1599-1611.
- Venkatesh, T., Narendra, Y. (2017). Modeling & Designing of A Novel Multilevel STATCOM With SVPWM Fed VSC For The Dynamic Stability Improvement Of A Grid- Connected Offshore wind Farm. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5, 7795-7804.



Derin Maden Sondajlarında Ön İnceleme Aşaması Mühendislik Yaklaşımları ve Fizibilite Etütlerinin Gerçekleştirilmesi

Preliminary Stage Engineering Approaches in Deep Mining Drilling and Performing the Feasibility Investigations

Mustafa Can Canoğlu¹

¹Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, 57000 Sinop, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 26/02/2019

Kabul/Accepted: 30/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Sondaj, sanayi devrimi sonrasında artan hammadde ihtiyacıyla beraber sıkça kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Özellikle 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren, başta madencilik sektörü olmak üzere, petrol, yeraltı suyu ve jeoteknik araştırmalarda derin ve sığ sondajlar gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, yerbilimleri ve maden mühendisliğinin sektörel bazda en önemli iş dalı olan sondaj sektöründeki fizibilite aşaması arazi incelemeleri detaylandırılmıştır. Bu bağlamda, özellikle derin maden sondajları için gerçekleştirilen ön inceleme aşaması arazi incelemeleri ve fizibilite etütleri hüristik mühendislik yaklaşımlarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu mühendislik yaklaşımları, proje alanının lojistik durumu, makine personel ve ekipmanın proje alanına ulaşım olanakları, proje alanının işçi sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesi, klimatolojik koşulları, sondajın gerçekleştirileceği jeolojik formasyonun gözlemsel olarak sondaj performansına muhtemel etkileri gibi konuların yerinde değerlendirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Sondaj performansını arttırmaya yönelik kullanılacak sondaj katkıları, taşıyıcı ve soğutucu ajan olarak kullanılacak suyun temini ve zemin türüne uygun sondaj tekniğinin seçimi de bu çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Fizibilite aşamasındaki bir araştırma sondajına başlanmadan önce gerekli saha çalışmaları kapsamında gerçekleştirilecek incelemeler ve dikkat edilmesi gereken hususlar detaylandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Sondaj, Maden araştırma sondajı, Derin sondaj, Sondaj fizibilite etütleri”

Abstract

Drilling becomes a technique that is utilized frequently with the increase of raw material need after the industrial revolution. Deep and shallow drilling are implemented in petroleum, groundwater exploitation, geotechnical investigations and especially in mining industry since second part of the 19. century. In this study, feasibility stage field investigations of the drilling sector as the most important business segment of the engineering and mining geoscience is elaborated. In this context, preliminary stage of field examinations and feasibility investigations were fulfilled with heuristic engineering approaches. These engineering approaches consider the logistic situation of the project area, the transport possibilities of drill rig, drilling equipment and field staff, evaluation of the project area in terms of health and safety, climatological conditions and the possible effects of the geological conditions on the drilling performance. The utilization of drilling additives to increase the drilling performance, the water supply as the transporting and cooling agent and selection of appropriate drilling technique considering the ground conditions were assessed within this study. Before starting to an exploration drilling required feasibility stage examinations and points to consider were detailed.

Key Words

“Drilling, Mining exploration drilling, Deep drilling, Drilling feasibility investigations”

1. Giriş

Türkiye’de jeoloji mühendisliği, hidrojeoloji mühendisliği, maden mühendisliği, jeofizik mühendisliği gibi yer bilimleri temelli mühendislik dallarının özel sektördeki iş imkânları içerisinde sondaj sektörü en çok mühendisi istihdam etmektedir. Özellikle, maden, petrol ve inşaat sektörlerinde kullanılan farklı sondaj teknikleri özel makine ve teçhizat ve tecrübeli teknik personel gerektirmektedir. Sondajlar mevcut hammadde olanaklarının niteliksel ve niceliksel olarak araştırılmasının yansısı, petrol ve yeraltı suyunun işletilmesi amaçlı olarak da açılmaktadır. Ayrıca, artan küresel ısınma tehdidine karşı yenilenebilir enerji kaynağı olan jeotermal kaynakların işletilmesinde de sondaj teknikleri çok önemli rol oynamaktadır. Sondajların inşaat sektöründe kullanımı ise jeoteknik amaçlı yerinde deney yapma ve numune almaya yönelik olabileceği gibi enjeksiyon gibi zemin iyileştirme yöntemlerinde de sondaj teknikleri kullanılmaktadır. Sondajlar, bilimsel araştırmalarda farklı amaçlar için birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Navarro vd. 2019; Sneddon vd. 2013; Kurtuluş & Bozkurt, 2010; Özbayoğlu, 1979; Canoglu & Kurtuluş 2017(a); Canoglu & Kurtuluş 2017(b); Canoglu & Gökkurt Baki, 2018; Canoglu, 2018, Cao vd. 2018).

Maden araştırma sondajlarının en büyük avantajı jeofizik yöntemlerle tam olarak belirlenemeyecek cevherleşme özelliklerinin net bir şekilde niteliksel ve niceliksel olarak boyutlandırılabilmesidir. Bir maden sahasında, sondajın işletmeye açılmadan önce gerçekleşmesi durumunda öngörülemez birçok mühendislik problemi sondajlarla belirlenebildiğinden işletme aşamasında öngörülen sorunlara önlem almak işletme maliyetlerini çok büyük oranda azaltmaktadır. Sondajların dezavantajı ise jeofizik yöntemlere göre daha pahalı olması, özel makine ve ekipman ve de tecrübeli personel gerektirmesidir. Sondajların bir diğer dezavantajı da operasyonlar sırasında kullanılan sondaj ekipmanlarının işçi sağlığı ve güvenliği açısından en riskli sınıfta olmasıdır. Her yıl sondajlarda birçok yaralanmalı, ağır yaralanmalı ve ölümlü kazalar gerçekleşmektedir. Bu durum uygun kişisel koruyucu ekipmanların kullanımı ve periyodik bakım gibi önlemlerle azaltılmaya çalışılsa da sondajlarda önemli bir dezavantaj olarak kabul edilmektedir.

Türkiye’de sondaj sektörü üç farklı alana hizmet etmektedir. Bu alanlardan en çok ekonomik getiriye sahip olan alan petrol endüstrisidir. Petrol sondajı diğer sektörler için gerçekleştirilen sondaj yöntemleri arasında en derin ve en karmaşık olanıdır. Sondaja ihtiyaç duyan diğer bir sektör ise jeotermal sektördür. Jeotermal enerji amaçlı açılan sondajlar da son derece pahalı, derin ve karmaşıktır. Sondaj sektöründe en uygun fiyatlı ve en basit sayılabilecek alan jeoteknik sondajlardır. Bu sondajlar genellikle jeoteknik veri elde etme amaçlı açılır ve fiyat olarak diğer sondaj türlerine göre daha uygundur. Bu çalışmanın da kapsamı içerisinde olan maden sondajları özellikle Türkiye’de son 20 yıldır çok gelişme kat etmiş ve Türkiye’yi sondaj makinesi ve ekipmanları üreten ve ihraç eden bir konuma getirmiştir. Bu nedenle, özellikle maden sondajları alanında gerçekleştirilen bilimsel ve uygulamaya yönelik çalışmaların ülke ekonomisine katkı anlamında önemi büyüktür.

Gerçekleştirilen sondaj çalışmalarının performansını birbirinden bağımsız birçok parametre kontrol etmektedir. Bu parametreler içerisinde, sondörün tecrübesi, sondaj makinesinin teknik özellikleri ve dayanıklılığı, sondajda kullanılan sondaj ekipmanının kalitesi ve zemin koşullarına uygunluğu, kullanılan sondaj katkı malzemelerinin doğru karışımlarla kullanılması gibi faktörler en önde gelenlerdir. Bunlarla beraber, sondaj platformunun geometrisi, soğutucu ve taşıyıcı ajan olarak kullanılacak sondaj suyu temini, sondaj yapılacak jeolojik formasyonun litolojik koşulları (sertlik, dağılma, dayanım, şişme, kohezyon vb.) da sondajın performansını ve projenin ekonomisini doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle, sondaja (özellikle derin maden sondajına) başlanmadan önce fizibilite aşamasında saha ön inceleme etütlerinin gerçekleştirilmesi proje ekonomisi ve sondaj performansının artırılması açısından çok önemlidir. Ayrıca iyi etüt edilmeden başlanan sondajlarda çok fazla yakıt ve sondaj ekipmanı sarfıyatı olacak ve ilerleme çok yavaş gerçekleşecektir. Örneğin, zor zemin koşullarında ve kuyunun yıkılma riskinin olduğu bölgelerde gerçekleştirilen sondajları tecrübesi nispeten daha az sondörlerle gerçekleştirmek kuyu ve ekipman kaybı gibi büyük riskler taşır. Ayrıca, kullanılacak sondaj katkısının doğru zeminde doğru oranlarda kullanılmaması kuyuda yıkılmaları ve sondaj ekipmanının kuyu içerisinde sıkışmasına neden olur. Sondaj performansının ön inceleme aşamasında değerlendirildiği bu çalışma mühendislik yaklaşımları ve sondaj işleminin rantabilitesinin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma kapsamında, gerçekleştirilecek sondaj operasyonlarının performansını arttırmak, projeyi daha ekonomik hale getirmek ve sondajda kullanılacak makine ve ekipmana karar verebilmek adına Arnavutluk’ta gerçekleştirilecek olan derin maden sondajları için fizibilite aşaması saha ön inceleme etütleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, sondaj projesi, proje bölgesine makine ve personel ulaşımı, sondaj platformlarının geometrisi ve yerinde incelenmesi, sondaj sahasına proje içi ulaşım koşulları, bölgenin iklimi ve çalışmaya elverişliliği, sondaj yapılacak zeminin litolojik özellikleri ve sondaj suyu temini açısından değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve yöntem

Sondaj projesine başlanmadan önce fizibilite aşaması saha incelemelerinin detaylı bir şekilde gerçekleştirilmesi ve raporlanması projenin rantabilitesi açısından büyük önem arz etmektedir. Saha incelemesine gerçekleştirilmeden önce, proje lokasyonu hakkında elde edilebilecek tüm bilgiler toplanmış proje sahası hava fotoğrafları ve uydu görüntülerinden incelenmiştir. Ayrıca, proje hakkındaki raporlar, fotoğraflar ve bilgiler toplanmıştır. Bununla beraber, saha yurtdışında olduğu için gidilecek ülkenin nüfusu,

ekonomisi, sanayileşme durumu, mazot fiyatları, vergilendirme, sosyal güvenlik sistemi, sigorta gibi konular detaylıca araştırılmıştır.

2.1. Proje bölgesine ulaşımın değerlendirilmesi

Proje bölgesine ulaşım, ekip ulaşımı ve makine ulaşımı şeklinde iki şekilde incelenmiştir.

2.1.1. Personel ulaşımı

Sondaj sahasına ekip ulaşımı eğer çalışma sahası yurtdışında ise bazı komplikasyonları beraberinde getirebileceği göz önüne alınmıştır. Örneğin; gidilecek ülkenin Türkiye'den vize istemesi işleri bir miktar zorlaştırabilir. Ayrıca, ülkedeki çalışma ve oturma izinleri de sondaj personeli hareketliliği açısından önemlidir.

Ayrıca, sahaya ulaşımın ne kadar zaman aldığı, kaç km olduğu, ne kadar karayolu ne kadar havayoluyla gitmek gerektiği iyice etüt edilmiş ona göre bir çalışma planı ortaya koyulmuştur. Bununla beraber, her bir kuyu lokasyonu için personelin sahaya minimum sürede ulaşımının sağlanabileceği konaklama noktalarının seçimi de ayrıca önemlidir.

2.1.2. Makine ve ekipman ulaşımı

Ulaşım ile ilgili önemli konulardan biri de makinenin proje bölgesine mobilizasyonudur. Sahaya ulaştırılacak sondaj makinesi ve ekipman miktarı göz önüne alınarak lojistik bir plan yapılmış, söz konusu şantiye yurtdışında olduğu için, makine ve ekipmanın gümrükte kaç gün bekleyeceği öngörülmüş, gümrükte çıkabilecek sorunlar araştırılmıştır.

2.1.3. Sondaj sahasına proje içi ulaşım koşulları

Sondaj sahasına proje için ulaşım yolları makine ve ekipman mobilizasyonu için önem taşımaktadır. Yolun eğimi, yolun yağmura karşı davranışı (kil içeriğine bağlı kayganlık), yolun genişliği vs. etüt sırasında göz önüne alınmıştır. Yolların durumu göz önüne alınırken, makinenin paletli olmasına rağmen bölgeye sağlanacak gerekli malzeme transferi de lojistik açıdan değerlendirilmiştir. Yani yolun eğimi 4x4 bir pick-up'ın rahatça tırmanabileceği durumda olup olmadığı incelenmiştir. Ayrıca bir ters dolaşım (RC) makinenin günde 600 litre mazot harcadığı göz önünde bulundurulursa, sondaj sahasına mazot taşınması konusu önem kazanacaktır. Eğer ortam çok eğimliyse ve variller pick-up üstünde gidemeyecek durumdaysa bu duruma bir çözüm getirmek gerekebilir (tanker ya da traktör kiralamak vs).

Bunlara ek olarak, makine çalışma sahasına en yakın nerede ve nasıl indirilebileceği de değerlendirilmiştir. Kullanılacak sondaj makinesinin ağırlığı ve işçi sağlığı güvenliği mevzuatı göz önüne alınarak en az 15 ton kapasiteli vinç ile sondaj makinesinin yüklenmesi ve indirilmesi planlanmıştır. Şantiye alanı ve yakın çevresinin vinç ile yükleme ve indirme için uygun olmadığı yerler için makinenin treylerden inebileceği topraktan bir rampa inşa edilmiş ve güvenli operasyon için rampanın kompaksiyonu planlanmıştır.

2.2. Proje alanının genel koşulları ve sondaja elverişliliğinin değerlendirilmesi

Proje alanı ve yakın çevresinin iklim koşulları sondaj operasyonlarının verimini ve işçi sağlığı güvenliğini doğrudan etkileyen bir durumdur. Sondaj projesinin fizibilite aşamasında klimatolojik koşullar açısından değerlendirilebilmesi için yıllık ortalama yağış, aylık ortalama yağış, aylık ortalama sıcaklıklar, aylık en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri gibi bilgilerin Türkiye'de Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, yurt dışında ise ilgili ülkenin meteoroloji birimleri tarafından elde edilmesi gerekir. Ayrıca, yağış miktarını tahmin etmek adına yeşil alan miktarı ve bitki örtüsünün de fikir verebileceği göz önüne alınmalıdır.

Sondaj sahasının operasyonlara elverişli olabilmesini etkileyen bir diğer faktör de sondaj platformunun geometrisidir. Genel olarak bir sondaj makinesinin ebatları kaba olarak 3m x 5m dir. Güvenlik ekipmanları, araç giriş çıkışı, mazot varili, tij sehpası ve sondajın eğimli olarak yapılacağı da göz önüne alınırsa, minimum 10mx15m'lik bir sondaj platformu işlerin güvenli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için gereklidir. İşçi sağlığı ve güvenliği açısından çalışma sahası ne kadar büyük olursa o kadar iyi koşullarda ve güvenli iş yapılacağı ve sondaj operasyonlarının verimli olacağı göz önüne alınmıştır. Bununla beraber herhangi bir galeri ya da yeraltı açıklığında gerçekleştirilecek sondajlar için ise üst taraftan bir sınırlama olmasından dolayı sondaj kulesinin boyuna göre yeraltı açıklığının projelendirileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca, maden sondajı için günümüzde kullanılan paletli sondaj makineleri %20 eğimde operasyonları yürütebilecek kapasitedelerdir ancak eğimli alanlarda gerçekleştirilen sondaj operasyonlarında iş kazalarının daha sık görülmektedir.

Sondaj operasyonları için fizibilite aşamasında gözlenmesi gereken bir konu da sondaj yapılacak formasyonun fiziksel karakteristikleridir. Bu konuyla ilgili bilgi edinebilmek için proje alanı ile ilgili bilimsel literatür taranmış bölgenin jeolojik haritası ve kolon kesiti elde edilmiştir. Böylece sondajı negatif yönde etkileyecek fay zonları, kırık çatlaklar, kohezyonsuz birimler, intrüzyon kontak zonları ve altere zonlar tespit edilmiştir. Sondaj operasyonları sırasında killi altere olmuş zonlar, ve intrüzyon kontak zonları ince taneli yapıya sahip olduklarından ekipmanın su girişini tıkayarak takım sıkışmasına neden olur. Ayrıca intrüzyon kontak zonları ve altere olmuş zonlar, dayanımsız olduğundan kuyu çökmesine neden olurlar. Bu tip durumlar çok

öngörülebilir olmasa da fizibilite aşamasında gerçekleştirilen araştırmalar, sondaj ve ekipman planlaması için gerekli önlemlerin alınabilmesini sağlamaktadır. Bu önlemler, kullanılan polimerdeki kimyasal katkı maddelerinin oranının değiştirilmesiyle gerçekleşir bu da maliyeti arttırabilen bir faktördür. Kırık çatlaklı zonlarda ise karot verimi düşecektir ve manevra boyu azalacaktır, bu da göz önüne alınması gereken önemli bir durumdur. Kumlu zonlar ise kohezyonsuz olduğundan karot alınmaz, bunun için özel ekipman gerekir bu durumu da dikkate alınması gereken önemli konulardan biridir.

Tüm bu fiziksel özellikleri belirlenirken sahada varolan yarma ve/veya araştırma çukurları vs. incelenmiş kil oranı gözlemsel olarak belirlenmiş, plastisite indisi göz kararı dokunarak tahmin edilmiştir. Ayrıca eğer bölgede yapılan başka sondajlara ait bilgiler toplanmış ve karot örnekleri ve sondaj logları incelenmiştir. Bunların dışında, mineralize olmuş zonun tahmin edilen derinlik ve kalınlığı, RC ve karotlu kuyuların ortalama derinlikleri ve açıları ve de kuyular arası ortalama uzaklıklar da sondaj operasyonlarının ekonomik koşullarını ve rantabilitesini doğrudan etkilemektedir.

2.2.1. Sondaj Suyu Temini

Karotlu derin maden sondajlarında taşıyıcı ve soğutucu ajan olarak su kullanılmaktadır. Fizibilite aşamasındaki bir saha incelemesinde karotlu sondaj için delgi suyu temini adına en yakın yüzey suyunun yeri ve bulunduğu kot tespit edilmeli ve suyun basılacağı kota göre su pompası ve hortum proje için temin edilmelidir. Eğer su pompalamak akılcı değilse, tanker ya da diğer araçlarla suyun sondaj sahasına ulaşması konusu düşünülmelidir. Su kuyusu açmak mantıklıysa, bu konu da değerlendirmeye alınabilir. Söz konusu projede de su temini ile ilgili tüm bu konular dikkate alınmış ve en ekonomik seçenek göz önüne alınarak planlama yapılmıştır.

2.2.2. RC ve Karotlu Sondaj Koşulları

RC tip sondajın karotlu sondaja göre avantajları ve dezavantajları vardır. RC sondaj karotlu sondaja göre çok daha hızlı ilerleme imkanına sahiptir. Ancak, alınan numunede kaya ortamının kırık çatlak veya faylanma gibi yapısal özelliklerini yansıtmamaktadır. Ayrıca derinlik olarak RC sondaj karotlu sondaja göre çok saha sığdır ve RC sondajda uzmanlaşmış sondör ve işçi çalıştırmak gereklidir. Bunun dışında RC ekipmanları karotlu sondaj ekipmanlarına göre çok daha ağırdır ve iş kazaları açısından daha büyük risk taşımaktadır. Ayrıca, RC sondaj ekipmanı yapısı gereği yeraltısuyunun altındaki kotlarda verimsiz çalışmakta hatta çalışmamaktadır. Be nedenle, bölgede RC sondaj alternatifi için yeraltı suyu seviyesi ve artezyen durumu göz önünde bulundurulmuştur. Yeraltısuyu koşullarına dair sahada herhangi bir veri olmaması durumunda çalışma alanının topoğrafyası ve yüzey suyu koşullarından yeraltısuyu derinliği ile ilgili tahmin yürütülmüştür. Tüm bunlarla beraber, mineralize olmuş zonun tahmini derinliği ile RC ve karotlu sondaj makinalarının derinlik kapasiteleri karşılaştırılmış uygun makine tipi üzerinden planlama yapılmıştır.

2.3. Personel Konaklaması ve Diğer Konular

Fizibilite aşamasındaki bir sondaj sahasının incelemesinde araştırılması gereken önemli konulardan bir diğeri de sondör ve işçi personel ile şantiye şefinin konaklaması ve proje içi sahaya ulaşımıdır. Bu konudaki önemli nokta, kalınacak yerin saha olan uzaklığıdır. Kalınacak yer sondaj sahasına mümkün olduğunca yakın rahat ve güvenli olmalıdır.

Saha incelemesinde, dikkat edilmesi ve araştırılması gereken diğer bir konu da çalışma alanının yakınlarında bir sanayi bölgesinin olup olmadığıdır. Bu nedenle, ihtiyaç duyulması halinde sondaj sahasının hemen yakınında tornacı, kaynakçı vs. bulunan bir sanayi bölgesinin olup olmadığı araştırılmış eğer yakınlarda yoksa bu tip temel sanayi işlevlerini görebilecek en yakın sanayi yerleşkesi tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışılan bölgeye para transferi konusu da önem taşımaktadır. Söz konusu şantiye bir yurtdışı şantiyesi olduğundan çalışılacak bölgeye para transferi yapmanın en ucuz, en kolay ve en güvenli yolu araştırılmıştır. Bununla beraber, lokal işçi temini ile ilgili detaylar mevcut personelin izinli olduğu durumlar için araştırılmıştır. Son olarak da hem işçi sağlığı ve güvenliği açısından hem de projenin hızlı yürütülebilmesi açısından büyük önem taşıyan konulardan biri olan haberleşme konusu araştırılmıştır. Bölgede ve özellikle sondaj sahasında cep telefonunun çalışıp çalışmadığı, en ucuz ve en verimli GSM operatörü araştırılmıştır.

3. Etüt Edilen Sondaj Sahaları

Çalışmaya konu olan Arnavutluk Ülkesinde 5 farklı lokasyonda bulunan 4 adet maden cevherinin detaylı niteliksel ve niceliksel araştırmasının yapılabilmesi için sondaj çalışmaları planlanmaktadır. Krom, Altın, Platin ve Bakır madenleri için gerçekleştirilecek olan bu sondaj operasyonları gerçekleştirilmeden önce sondajın daha etkin, ekonomik ve hızlı olabilmesi için fizibilite aşaması saha ön incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, krom madeni için, Perroi Batres ve Kalimash loksasyonları, platin madeni için Lumth lokasyonu, bakır madeni için Rubik ve Derven lokasyonları, altın madeni için ise Gjzuj lokasyonu detaylı olarak sondaja elverişlilik açısından incelenmiştir.

3.1. Krom maden sahaları (Perroi Batres ve Kalimash–3 lokasyonları)

3.1.1. Perroi Batres lokasyonu

Planlama açısından Arnavutluk'a gönderilecek sondaj makinesinin çalışmaya başlayacağı ilk lokasyonun Perroi Batres lokasyonudur. Bölgenin deniz seviyesinden yüksekliği 1400 metredir. Bu lokasyonda toplam 2000-3000 m delgi gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Arazi çalışmaları sırasında makinenin ulaşamayacağı yerler için 60°-90° arasında eğime sahip kuyuların açılması uygun görülmüştür. Makine bu bölgeye treyler üzerinde getirilmesi ve maden sahasına kadar yaklaşık 2 km palet üzerinde yürütülmesi planlanmıştır. Sondaj operasyonları için inşa edilmiş yollar boyunca oluşturulması öngörülen 10m x 15m boyutlara sahip sondaj platformu üzerinde operasyonların gerçekleştirilmesi planlanmıştır. (şekil 1).



Şekil 1. Perroi Batres lokasyonunda üzerinde sondajların yapılacağı yol

Gerçekleştirilen sha çalışmalarında sondaj yapılacak formasyonun ultra bazik kayalardan (Dünit, Peridotit, Serpantinit vs.) oluştuğu anlaşılmaktadır. Bölge çok ciddi bir tektonizma etkisine maruz kalmış ve kaya ortamında çok sayıda çatlak ve fay setlerinin oluşmasına yol açmıştır. Bu durum civardaki kayaların yer yer bozunma zonları oluşmasına sebep olmuştur. Çalışılacak sahada gözlenen bozunma zonlarının çok fazla olması, sondaj sırasında takım sıkışması ve kuyu çökmesini beraberinde getirebilir, bu nedenle sondaj katkısı olarak puzolonik malzeme ve bentonit karışımının doğru oranlarda yapılması büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, bölgede 6 adet süreksizlik seti saptanmış olup, süreksizlik sıklığı ve devamlılığı oldukça yüksektir (şekil 2).



Şekil. 2. Perroi Batres çalışma sahasındaki bir mostra zonu ve süreksizlik setleri

Bölgedeki kırık çatlak oluşumları ve aldığı yıllık yağış (yaklaşık 1200mm/yıl) göz önünde bulundurulursa yeraltı su seviyesi açısından bölge RC sondaja müsait değildir. Ayrıca karotlu sondaj için su temini traktör ya da tankerle yapılması uygun görülmüştür. Eğer yüzey suyundan sondaj sahasına su pompalanma alternatifi değerlendirilirse, en yakın yüzey suyunu pompalamak için 300 m yüksekliğe su basabilecek bir pompaya ve 700-800 metrelik 30 bar basınca dayanıklı bir hortum gerekecektir. Mazotun ise sondaj sahasına 100 litrelik varillerle parti parti getirilmesi en kolay seçenek olarak gözükmektedir.

Çalışma sahasına en yakın şehir 40 km uzaklıktaki Kukes şehridir. Personel konaklaması bu bölgedeki bir otelde gerçekleştirilecektir. Bölgede torna ve kaynak işlerinin yapılabileceği iş yerleri mevcuttur. Sondaj sahasında GSM operatörü sorunsuz şekilde çalışmaktadır.

Buradaki sondaj operasyonu bittikten sonra, makine tekrar 2 km palet üzerinde yürüttükten sonra, treyler ile Perroi Batres'e 11 km uzaklıktaki Kalimash-3 bölgesine götürülmesi planlanmıştır.

3.1.2. Kalimash-3 lokasyonu:

Makine Perroi Batresten ayrılıp 11 km treyler üzerinde seyahat ettikten sonra Kalimash-3 lokasyonuna gelecek ve burada palet üzerinde 7-8 km kadar ilerleyecektir. İlerleyeceği yol yer yer çok daralmaktadır. Bu nedenle yolun genişletilmesi gerekmektedir. Bu lokasyonda toplamda minimum 1000 m delgi planlanmakta olup, sondaj çalışmalarından elde edilecek verilere göre maden rezervini detaylandırabilmek için 2000-2500m delginin bu bölgede gerekli olabileceği öngörülmektedir.

Sondaj lokasyonu eski bir açık maden işletmesinin üzerinde planlanmıştır ve topoğrafya eğimli değildir (şekil 3). Daha önce işletilen maden ocağı krom fiyatlarının düşmesiyle rantabilitesini kaybetmiştir. Güncel krom fiyatlarıyla bölgedeki maden rezervinin ekonomik olup olmadığı araştırılacaktır.



Şekil. 3. Kalimash-3 lokasyonundaki sondaj sahası (eski açık işletme)

Ayrıca bu açık işletmenin hemen Güneyine yol ve sondaj platformu (10m x 15m) açılıp bir miktar da orada sondaj yapılması planlanmıştır. Söz konusu sondajlar, güneyde açılacak proje içi ulaşım yolu üzerinde gerçekleştirilecek olup, 6–7 adet yaklaşık 50’şer metrelik kuyular şeklinde düşünülmektedir. Bu bölge yeraltı suyu ve cevherleşmeye bağlı hedef sondaj derinliği göz önünde bulundurulduğunda RC sondaj için uygun olarak değerlendirilebilir. Bölge sondaj suyu açısından fakir denecek kadar kısıtlı bir konumdadır. Bu lokasyonun sondaj suyu temini için tek yolu tanker ya da traktörle su taşınmasıdır. Aynı şekilde mazot da sondaj sahasına 100 litrelik varillerle rahatça taşınabilir.

Sondaj yapılacak formasyon ultrabazik kayalardan (Dünit, peridotit, serpantin vs.) oluşmaktadır. Bu bölge de Peroi Batres bölgesi gibi tektonik etkilere maruz kaldığından kaya ortamında birçok kırık çatlak sistemleri ve faylanmalar mevcuttur. Bölge içerisinde incelenen mostrada 5-6 adet süreksizlik seti bulunmakta ve Peroi Batres lokasyonundaki gibi bu süreksizliklerin devamlılıkları ve sıklıkları oldukça fazladır. Ancak bozunma zonları bir önceki lokasyondaki kadar yaygın değildir. Bu bölge için de sondaj katkısı olarak puzolonik malzeme ve bentonit karışımının doğru oranlarda kullanılması sondaj performansını arttıracaktır.

Bölgenin deniz seviyesinden yüksekliği 800 m civarındadır. GSM operatörü bölgede sorunsuz şekilde çalışmaktadır. Çalışma sahasına en yakın şehir gene kukes şehridir. Kukes, çalışma sahası olan Kalimash-3 lokasyonuna 40 km uzaklıktadır ve bu mesafe, yetersiz yol koşulları nedeniyle 1-1,5 saat sürebilmektedir.

3.2. Platin Maden Sahası (Lumth Lokasyonu)

Platin madeni sahası Lumth lokasyonunda bulunmaktadır. Bu sahaya en yakın şehir Rreshen şehridir. Sondaj sahasının deniz seviyesinden yüksekliği 250 metredir. Sondaj makinesinin Kalimash-3 (Krom maden sahası) lokasyonundaki işi bitince, 7-8 km palet üzerinde yürüyecek ve treylerle 120 km uzaklıktaki (4 saat) Lumth Lokasyonuna ulaşacak ve 1-2 km de buradan Platin sondaj sahasına gidebilmek için palet üzerinde yürüyecektir. Bölgede sondaj sahasına giden eski bir yol mevcuttur ancak ama yolun bazı yerlerde revizyona ihtiyacı bulunmaktadır (şekil 4). Yapılacak sondajlar, revize edilecek bu yollar üzerindeki sondaj platformlarında (10m x 15m) yapılacaktır. Maden rezervinin geometrisini ve niteliğini belirlemek amacıyla bu sahada her biri aşağı yukarı 200’er metrelik 2-3 kuyu açılması planlanmaktadır. Kuyu eğimlerinin 80°-90° arasında değişmesi öngörülmektedir.



Şekil. 4. Lumth lokasyonu platin madeni araştırma sahası

Platin ve bakır gibi madenler bazik kayaçların içinde cevherleşir, dolayısıyla sondaj operasyonlarının gerçekleştirileceği jeolojik formasyonda bazik kayaçlar hâkim. Bölgenin çok ciddi tektonik aktivitelere maruz kalmış olduğu arazide gözlenen faylardan ve kırıklı çatlaklı kayaç yapısından anlaşılmaktadır. Lumth lokasyonu ultrabazik-bazik kontak zonunu da içine aldığından bol miktarda bozunma gözlenmiştir. Bozunma zonlarında, düşük plastisiteli kile (CL) sıklıkla rastlanmıştır. Bu nedenle özellikle bu sahada gerçekleştirilecek sondajlarda sondaj katkısı olarak kullanılacak polimer seçimi çok dikkatli yapılmalıdır.

Hedef derinlik açısından bu bölge de RC sondaja müsait değildir fakat bu bölge için herhangi bir artezyen durumu söz konusu olmaz. Ayrıca, Sondaj suyu temini için yakınlarda herhangi bir kaynak saptanamamış, önceki sondaj lokasyonlarındaki gibi mazot ve suyun sahaya traktör ya da tankerle birkaç seferde taşınması uygun görülmüştür. Personel konaklaması için çalışma sahasına en yakın şehir olan Rreshen incelenmiştir. Bu şehirde sondaj operasyonu sırasında ihtiyaç duyulabilecek torna, kaynak vs. gibi temel işlerin yaptırılabilceği bir sanayi bölgesi bulunmaktadır. Sahada GSM operatörü sorunsuz çalışmaktadır.

Buradaki sondaj işleri bittikten sonra, sondaj makinesinin 5 km palet üzerinde Rubik lokasyonunda bulunan Bakır sahasına yürütülmesi planlanmıştır. (Lumth-Rubik arası 5-6 km).

3.3. Bakır Maden Sahaları (Rubik ve Derven Lokasyonları)

Sondaj makinesinin Lumth lokasyonundaki sondaj işleri bittikten sonra hiç treylere binmeden direk palet üzerinde 5 km kadar yürüdüktan sonra Rubik lokasyonundaki bakır sahasına gelmesi en ekonomik seçenek olarak görülmektedir. Bakır sahasında da yolların yer yer revizyona ihtiyacı vardır. Bu sahanın deniz seviyesinden yüksekliği 520 metredir. Yer altı suyu koşulları ve jeolojik formasyon özellikleri Lumth lokasyonundaki platin sahasıyla bezer özellikler göstermekte olup herhangi bir basınçlı akifere rastlanmamıştır.

Mineralize olmuş zonun tahmini derinliği göz önüne alınarak bu bölgede 2-3 adet 200'er metrelik kuyular planlanmaktadır. Ancak cevherleşmenin düşey devamlılığına bağlı olarak kuyularda 300 metreye kadar sondaja devam etme durumu da değerlendirilmiştir. Bu koşullar altında hedef derinlik çok fazla olduğundan RC sondaj bu lokasyon için uygun görünmemektedir. Mineralize zonun kesilebilmesi için bazı kuyularda 60°-70° arasında değişen kuyu eğimleri planlanmıştır. Sondaj suyu için burada da herhangi bir kaynak bulunmamaktadır, en mantıklı çözüm bu saha için de traktör ya da tankerle taşımadır. Konaklama çalışma sahasına en yakın şehir olan Rreshen de gerçekleştirilecektir. Bu şehirde iş sırasında ihtiyaç duyulabilecek torna, kaynak vs. gibi temel işlerin yaptırılabilceği bir sanayi bölgesi bulunmaktadır. Ayrıca mazot da bu şehirden sağlanacaktır. Şehrin sondaj sahasına uzaklığı 30 dk mesafededir. Ayrıca, sahada GSM operatörü sorunsuz çalışmaktadır.

Makine buradaki sondaj işlerini bitirdikten sonra tekrar palet üzerinde 5 km kadar orman yolundan yürüdüktan sonra treylere binecek ve altın işi için 31 km uzaklıktaki (45-55 dk) Gjazuj lokasyonuna ulaşacaktır.

3.4. Altın Maden Sahası (Gjazuj Lokasyonu)

Gjazuj lokasyonuna ulaşan sondaj makinesinin açılacak ulaşım yolları üzerinde 1 km palet üzerinde yürütüldükten sonra oluşturulan sondaj platformlarında operasyona başlaması planlanmıştır. Bu lokasyonda toplamda 500-600 metre sondaj yapılması öngörülmektedir. Söz konusu maden sahasında eski bir altın işletmesi bulunmaktadır ve maden sahası civarında 3 adet maden galerisi gözlenmiştir. Maden sahasında daha önce yeterli sayıda sondaj yapılmış, kesitler çizilmiştir. Ancak, önceki maden işletmesi eski teknoloji ile çalıştığından çıkarılan maden rantabl olmadığı için işletme kapanmıştır. Burada yeni madencilik teknikleriyle işletilmesi planlanan bu altın madeninde güvenli tarafta kalmak adına 2-3 adet maximum derinliği 150-170 metre olan kuyu açılması planlanmaktadır. Kuyu eğimlerinin 70°-90° arasında değişebileceği belirlenmiştir.



Şekil. 5. Gjazuj lokasyonu (altın madeni) jeolojik formasyon ve ufalanmış kaya mostrası

Bu formasyonda da bazik kayalar hakimdir ve herhangi bir ultrabazik-bazik kantağı gözlenmemektedir. Tektonizma etkisi çok fazla olmamasına rağmen kayalar sık süreksizlik setlerine sahiptir ve ufalandıkları gözlenmiştir (şekil 5). Bölge de yer yer bozunma zonları saptanmıştır ama bozunma etkisi diğer şantiyelerdeki gibi çok fazla değildir. Ayrıca bu lokasyon için sondaj suyunun 20-30 metre aşağıdan uygun debiyle akan dereden bir pompa aracılığıyla sağlanması uygun görülmüştür. Bölgeye mazot gene traktörle yada 100 litrelik varillerle parti parti sağlanacaktır. Bu bölge için de personel konaklaması açısından en uygun yerleşim birimi çalışma sahasına 45 dakika mesafedeki Rreshen şehridir. Ayrıca, burada da GSM operatörü her yerde olduğu gibi sorunsuz biçimde çalışmaktadır.

4. Sonuçlar ve tartışma

Sondaj operasyonları özellikle derin ve karot numune alınan operasyonlar için son derece pahalıdır ve uzmanlık gerektirmektedir. Operasyonlara başlanmadan önce gerçekleştirilecek fizibilite aşaması etütler kapsamında gerçekleştirilen saha incelemeleri, sondaj sırasında karşılaşılabilecek muhtemel sorunların öngörülmesi ve engellenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, gerçekleştirilen bu çalışma sübjektif mühendislik yaklaşımları içermekte olup, sahadan elde edilen verilerin ve varılan sonuçların tecrübeye bağlı olarak mühendisten mühendise değişebileceği hesaba katılmalıdır. Bununla beraber, madencilik ve sondaj alanında teknoloji her geçen gün gelişmektedir. Gelişen teknolojinin farklı mühendislik çözümlerini de beraberinde getireceği göz önüne alındığında sahanın sondaja uygunluğu ve rantabilitesi de günden güne değişecektir.

Arnavutluk ülkesinde farklı lokasyonlarda, krom platin altın ve bakır madenlerinin rezerv miktarlarının belirlenebilmesi için sondaj programı planlanmıştır. Bu bağlamda, Perroi Batres, Kalimash-3, Lumth, Rubik – Devren ve Gjazuj lokasyonlarında gerçekleştirilecek olan sondaj operasyonları için fizibilite aşaması etütler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalardan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Kuyu başına gerçekleştirilecek delgi miktarı ve jeolojik formasyonların ve hidrojeolojik koşulların genel olarak sondaj operasyonları açısından uygunluğu göz önüne alındığında ters sirkülasyonlu sondaj tekniğinin söz konusu sahalarda uygulanmasının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.
- Sondaj makinesinin sırasıyla, Perroi Batres, Kalimash-3, Lumth, Rubik – Devren ve Gjazuj lokasyonlarında iş yapmasının ulaşım ve lokal işçi temini açısından daha ekonomik olduğu sonucuna varılmıştır.
- Sondaj sahasına yakıt ve su temini için gerekli ön çalışmalar gerçekleştirilmiş ve her bir sondaj sahasının kendine özel koşulları dikkate alınarak yakıt ve su temini için gerekli işlemler belirlenmiştir.

- Jeolojik formasyonların sondaj operasyonlarına muhtemel etkileri de ayrıca her bir sondaj lokasyonu için göz önüne alınmış olup, ileri derecede eklenmiş ve çok kırıklı çatlaklı zonlar için gerekli sondaj katkılarının kullanılması gerekliliği göz önüne alınmıştır.

Teşekkürler

Yazar bu çalışmada araştırma maliyetlerini yüklenen Spektra Jeotek San. ve Tic. AŞ ailesine, özellikle çalışmaya katkıda bulunan Jeoloji Mühendisi Sn. A. Levent Okay ve ekibine teşekkür eder.

Referanslar

- Canoglu, M. C. (2018). Investigation of the Suitability of a Pipe Stock Site in Terms of Geotechnical Characterization and Engineering Design Parameters Considering the Economic Aspects. *Hittite Journal of Science and Engineering*, 5(2), 147-154.
- Canoglu, M.C. & Gökkurt Baki, O. (2018). Feasibility stage design assessment for transforming an unproductive dam into a sanitary landfill site. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27(12A), 9179-9188.
- Canoglu, M.C. & Kurtuluş, B. (2017a). Determination of the dam axis permeability for the design and the optimization of grout curtain: An example from Orhanlar Dam (Kütahya-Pazarlar). *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 5(1), 37-43.
- Canoglu, M.C. ve Kurtuluş, B. (2017b). Permeability of Savcıbey Dam (Bilecik) axis location and design of grout curtain. *Bulletin of Mineral Research and Exploration*, 154, 157-168.
- Cao, P., Liu, M., Chen, Z., Chen, B. & Zhao, Q. (2018). Theory calculation and testing of air injection parameters in ice core drilling with air reverse circulation. *Polar Science*, 17, 23-32.
- Kurtuluş, C. & Bozkurt, A. (2010). Geophysical and Drill-hole Investigations for Detecting Groundwater Aquifers Around Başiskele-Kocaeli. *Applied Geoscience*, 2, 1-9.
- Navarro, J., Segarra, P., Sanchidrián J.A., Castedo, R. & López, L.M. (2019). Assessment of drilling deviations in underground operations. *Tunneling and Underground Space Technology*, 83, 254-261.
- Özbayoğlu, Y. (1979). Elmaslı Sondajlarda Kuyu Sapmaları. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 18 (2), 33-40.
- Sneddon, A., Mearns, K. & Flin, R. (2013). Stress, fatigue, situation awareness and safety in offshore drilling crews. *Safety Science*, 56, 80-88.



Akımsız Kaplama Yöntemi ile Üretilmiş Grafen Takviyeli Gümüş Matrisli Nanokompozitlerin Yapısal Özelliklerine Banyo Bileşiminin Etkisi

Effect of Bath Composition on Structural Properties of Graphene Reinforcement Silver Matrix produced by Electroless Deposition

Ramazan Karshoğlu*¹

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 06010, Ankara, TURKEY

Başvuru/Received: 13/03/2019

Kabul/Accepted: 18/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Bu çalışmada akımsız kaplama yöntemi ile bakır altlıklar üzerine Gümüş (Ag) ve Grafen (Gr) takviyeli Ag matrisli nanokompozit kaplanmıştır. Ag kaplama banyoları içerisine farklı oranlarda Gr ilave edilerek Gr oranının mikro yapı ve mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Ag ve Ag-Gr nanokompozit kaplamaların yapısal özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM), Elektron dağılımlı X-ışınları spektrometresi (EDS), Raman ve X ışınları dağılım spektrometresi (XRD) yardımı ile mekanik özellikleri ise mikrosertlik yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Kaplama banyosuna Gr ilavesi belirgin bir şekilde matris mikroyapısını değiştirmiş ve yüzey sertliğini artırmıştır. En yüksek sertlik değeri banyo bileşimine 0.5 g/l Gr ilavesi ile elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Akımsız Kaplamama, Gümüş, Grafen, Nanokompozit”

Abstract

In this study, Silver (Ag) and Graphene (Gr) reinforcement Ag matrix nanocomposite coated on copper substrate by electroless coating method. Different amount of Gr was added to Ag electroless coating electrolyte and effect of Gr amount on microstructure and mechanical properties were investigated. Ag and Ag-Gr nanocomposites structural properties characterized with Scanning Electron Microscope (SEM), Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), Raman and X-ray Diffractions (XRD). Mechanical properties were measured with microhardness method. Gr addition to electrolyte was strongly affected matrix microstructure and increased hardness value. Highest hardness value was achieved with 0.5 g/l Gr addition to electrolyte.

Key Words

“Electroless Coatings, Silver, Graphene, Nanocomposites”

1. Giriş

Gümüş oda sıcaklığında en düşük elektriksel direnç ve en yüksek iletkenliğe sahip metal olması nedeni ile elektrik ve elektronik uygulamaları için büyük bir potansiyele sahiptir (Chen vd., 2010). Ancak düşük korozyon direnci nedeni ile elektrik ve elektronik sanayinde kullanımını kısıtlamaktadır (Manepalli, Stepniak, Bidstrup-Allen, & Kohl, 1999). Ayrıca Ag, Cu gibi elektrik ve elektronik uygulamalarda kullanılan metallerin sertlik ve akma dayanımları düşüktür. Bu nedenle yapının korozyon direnci, mukavemet ve setlik gibi özelliklerini artırmak için oksit, borür, karbür, karbon allotropları (karbon nanotüp, Grafen vb.) gibi fazlar ilave edilmektedir (Kwon vd., 2007).

Bu fazlar arasında üstün özellikleri ile Grafen (Gr) öne çıkmaktadır. Gr bal peteği şeklindeki kristal yapıda sp^2 karbon bağ yapısına sahip iki boyutlu malzemedir (Whitby, 2014). İki boyutlu yapıya sahip olan Gr gümümüzde nanokompozitler, elektriksel ve optik uygulamalar, kimyasal ve biyolojik sensor gibi bir çok alanda kullanım potansiyelinden dolayı dikkatleri üzerine çekmektedir (Krishnamoorthy, Kim, & Kim, 2013). Özellikle nanokompozit alanında iyi elektriksel, çok yüksek termal iletkenlik, yüksek korozyon direnci, yüksek elastik mukavemet gibi özelliklere sahip olması nedeniyle yüksek bir kullanım potansiyeline sahiptir (Sheng vd., 2015).

Nanokompozit kaplamaların üretimi için birçok üretim yöntemi kullanılmaktadır (Hwang, Toriyama, Sekino, & Niihara, 1998). Bu yöntemler arasında akımsız nanokompozit kaplamalar kolay uygulanabilir olması, homojen kalınlık ve mikroyapı sağlaması nedeni ile büyük bir avantaja sahiptir (Mallory & Hajdu, 1990; Wang, Ye, Ma, & Wang, 2008). Akımsız kaplama metalik tuz komplekslerinin otokatalitik reaksiyonları sonucunda kaplama malzemesinin altlık yüzeyinde birikmesi şeklinde gerçekleşmektedir (He vd., 2014). Nanokompozit kaplamak için kaplama banyosuna nano boyutta ikinci faz partikülleri ilave edilerek birikme esnasında ikinci faz partiküllerinin metal matris içerisine gömülmesi ile oluşur (Daoush, Lim, Mo, Nam, & Hong, 2009).

Bu çalışmada Ag matris içerisine üstün mekanik ve termal özelliklere sahip Gr ile takviye edilerek akımsız kaplama yöntemi ile bakır altlıklar üzerinde nanokompozit olarak biriktirilmiştir. Banyo bileşimine ilave edilen Gr miktarının mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

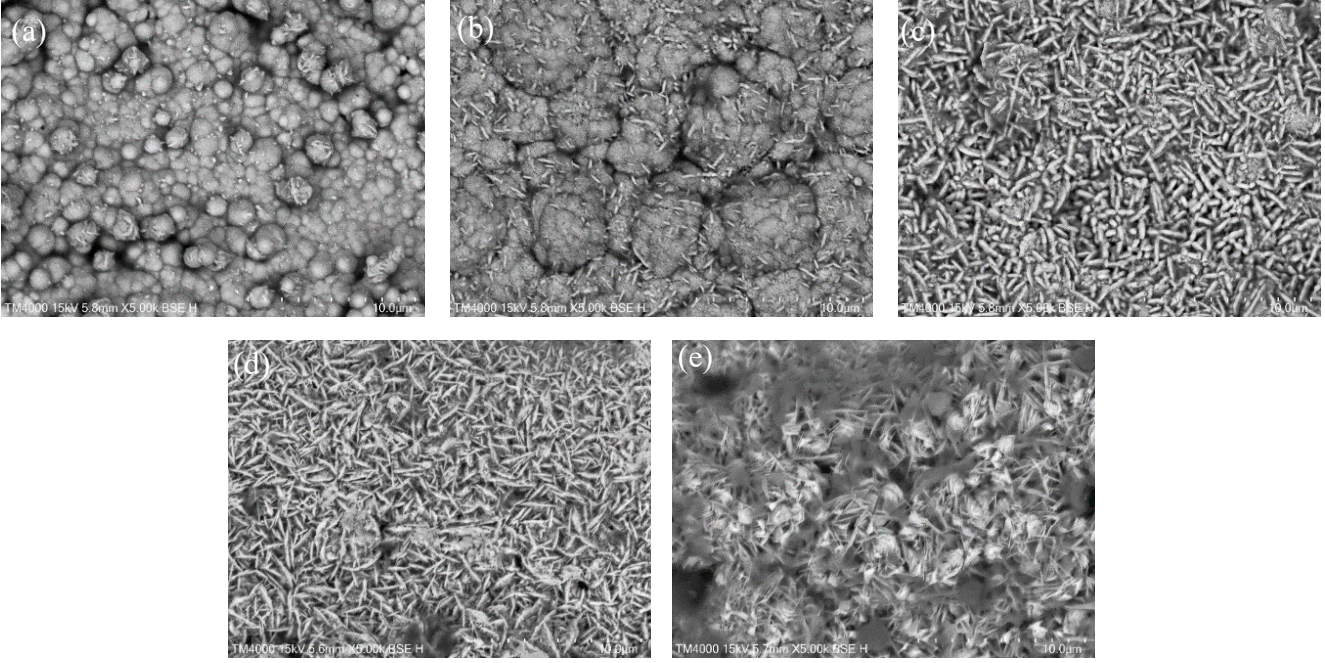
2. Materyal ve Metot

Grafen (Gr) takviyeli Gümüş (Ag) matrisli nanokompozitler akımsız kaplama yöntemi kullanılarak bakır (Cu) altlıklar üzerinde biriktirilmiştir. Kullanılan Cu altlıklar kaplama öncesi sırası ile 180, 320, 600, ve 1200 mesh zımpara ile yüzeyleri mekanik olarak temizlenmiş ve yüzey pürüzlülükleri düşürülmüştür. Mekanik işlem sonrasında Cu altlıklar Aseton ve metanol kullanılarak kimyasal temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Yüzeyleri mekanik ve kimyasal olarak hazırlanan altlıklar Ag kaplama banyosu içerisine daldırılmıştır. Ag kaplama banyosu 80 g/l gümüş nitrat ($AgNO_3$), 63.6ml/l amonyak çözeltisi (NH_4OH), 445 g/l Rochelle tuzu ($KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$) ve 30 g/l Epsom tuzundan ($MgSO_4$) oluşturulmuştur. Kaplama banyosunda $AgNO_3$ gümüş kaynağı, NH_4OH pH stabilizer, $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ redükleyici olarak davranmıştır. Daha sonra banyo bileşimine farklı oranlarda (0.5, 1.0, 2.0 ve 4.0 gr/l) ikinci faz malzemesi olarak Gr ilave edilmiştir. Takviye malzemesi olarak kullanılan Gr 1.5 μm çapındaki ve 3 nm kalınlığında 750 m^2/g yüzey alanına sahiptir. Ayrıca Gr ilave edilen kaplama banyoları kaplama öncesi 45 dakika ultrasonik homojenizatör kullanılarak Gr in banyo içerisine homojen dağılması sağlanmıştır. Kaplama oda sıcaklığında 9-11 pH ta 60 dakika süre ile yapılmıştır. İlave edilen Gr miktarının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir.

Üretilen kaplamaların Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak yüzey yapıları incelenmiştir. Elektron Dispersive Spektrometresi (EDS) kullanılarak elementel dağılımları belirlenmiştir. EDS analizinde edilen karbon elementinin allotropunu belirlemek ve Gr yapı içerisine yerleştiğini göstermek için kaplama Raman spektrometresi ile 532 nm boyutunda yeşil lazer kullanılmıştır. X-Işınları Difraktometresi (XRD) ile 1.54059 \AA dalga boyunda $Cu_{K\alpha}$ ışını kullanılarak kristal yapısı incelenmiştir. XRD incelemeleri $1^\circ/\text{dakika}$ tarama hızında $20-110^\circ$ (2θ) arasında yapılmıştır. Üretilen kaplamaların mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile mikrosertlik yöntemi kullanılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri 10 g yük altında 5 saniye süre ile tatbik edilmiştir. Her bir numuneden en az 5 er ölçüm alınıp ortalamaları sertlik değeri olarak alınmıştır. Kaplama kalınlıkları kaplama kalınlığı ölçüm probu kullanılarak yapılmıştır.

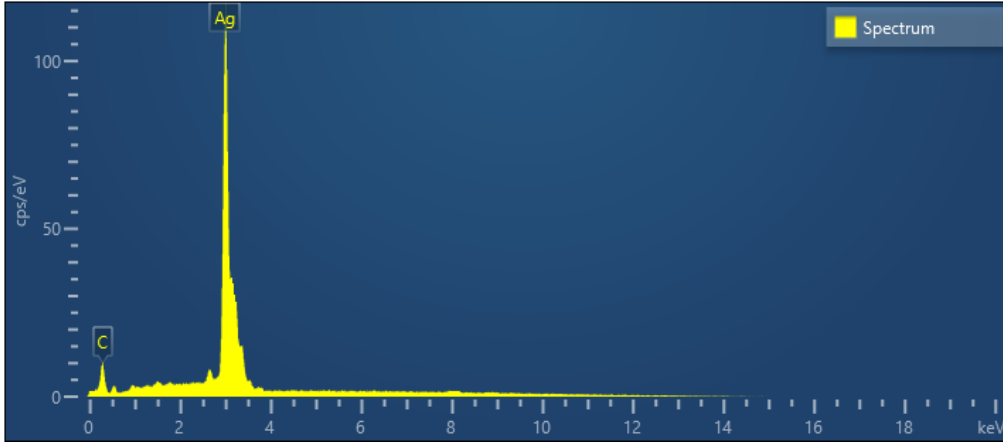
3. Sonuçlar ve Tartışma

Üretilen nanokompozit kaplamaların yüzey yapıları SEM kullanılarak incelenmiştir. Nanokompozit kaplamaların yüzey yapıları Şekil 1 de verilmektedir. Saf Ag kaplama tabakasındaki tanelerin ağırlıklı olarak küresel formda olduğu Şekil 1'a dan açıkça görülmektedir. Banyo bileşimine 0.5 g/l Gr ilavesi ile birlikte küresel tanelerin yanı sıra iğne yapılı tanelerin oluşumları başladığı gözlenmiştir (Şekil 1-b). Banyo bileşimine ilave edilen Gr miktarının 1.0 g/l çıkması ile birlikte yapının tamamen iğnemsiz yapıya dönüştüğü görülmüştür. Bu iğnemsiz yapıların banyo bileşimine 0.5 g/l Gr ilave edilerek üretilen nanokompozit yapılar ile karşılaştırıldığında boy ve çaplarında belirgin artış tespit edilmiştir (Şekil 1-c). Banyo bileşimine ilave edilen Gr miktarının 2.0 g/l çıkması ile birlikte yapı iğnemsiden fleyk (yapraksı) yapıya dönüştüğü Şekil 1-d den açıkça görülmektedir. Banyo bileşimine 4.0 g/l Gr ilavesi nanokompozit tabasında ilave edilen Gr'lerin aglomere olduğu (topaklandığı) görülmüştür (Şekil 1-e).



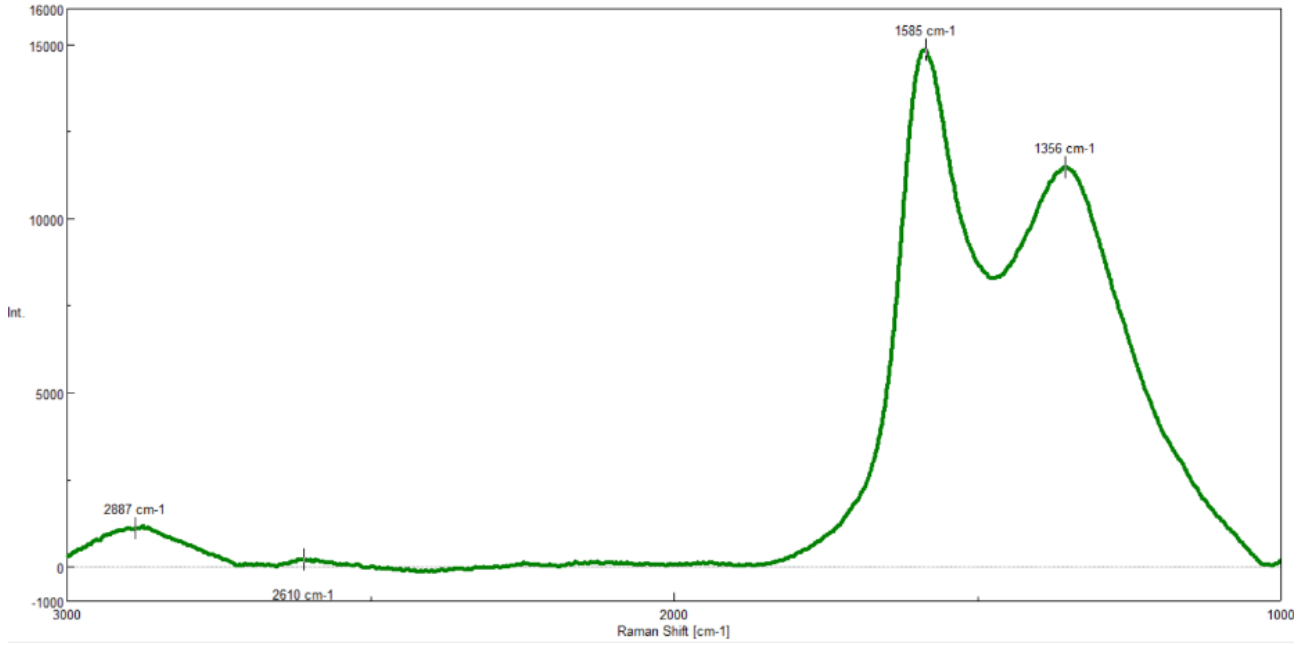
Şekil 1. (a) Saf Ag (b) 0.5 g/l , (c) 1.0 g/l , (d) 2.0 g/l, (e) 4.0 g/l Gr banyo bileşimine eklenerek üretilmiş nanokompozit kaplamaların Yüzey SEM görüntüsü.

Üretilen nanokompozit kaplamaların kimyasal bileşimini (elementel olarak) incelemek için EDS detektörü kullanılmıştır. EDS analizi sonucunda yapıda Ag ve Gr'ten gelen C pikleri görülmüştür. Banyo Bileşimine 1.0 g/l Gr ilave edilerek üretilen kaplama tabakasının EDS analizi Şekil 2'de verilmiştir. Banyo bileşimine ilave edilen Gr miktarının 0.5 g/l den 4.0 g/l artması ile birlikte nanokompozit kaplama tabakasındaki C oranı(%at.) 0.625 ten 5.82 ye çıktığı tespit edilmiştir.



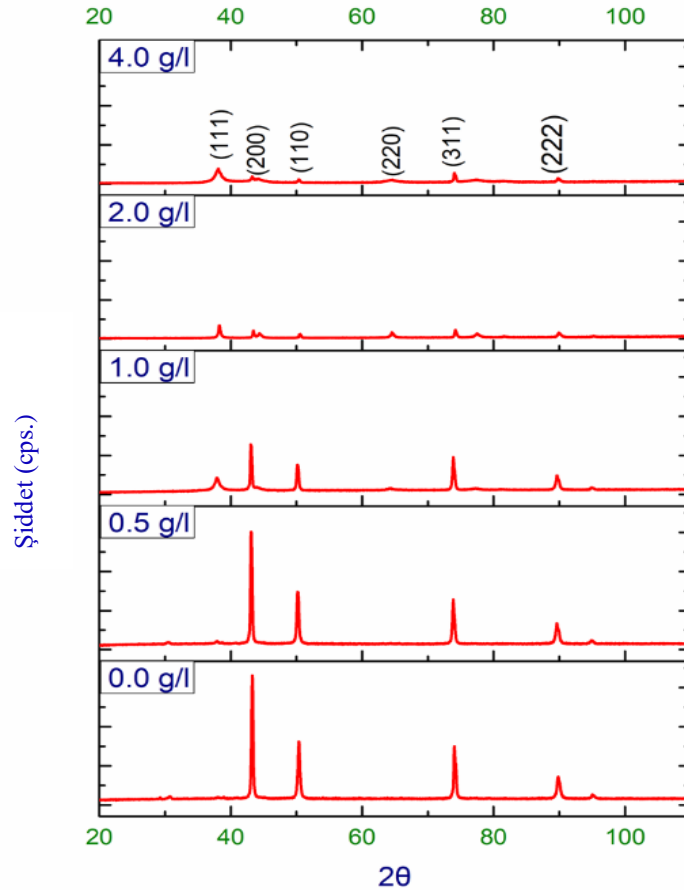
Şekil 2. Banyo Bileşimine 1.0 g/l Gr ilave edilerek üretilen kaplama tabakasının EDS analizi.

Nanokompozit kaplama yüzeyinden elde edilen EDS sonuçlarındaki C elementlerinin Grafen yapısında olup olmadığını tespit edebilmek için Raman analizi yapılmıştır. Şekil 3'te Banyo Bileşimine 2.0 g/l Gr ilave edilerek üretilen nanokompozit kaplama tabakasının Raman analiz sonucu verilmektedir. Diğer banyo bileşimlerinde elde edilen nanokompozit kaplamaların Raman spektrometresi analiz sonuçları benzer olması nedeni ile sadece banyo bileşimine 2.0 g/l Gr ilave edilmiş nanokompozit kaplamanın sonucu verilmiştir. Elde edilen Raman analizi sonucunda 1585 ve 1356 cm^{-1} de iki temel pik elde edilmiştir. Gr yapısına uygun olarak sırasıyla 1356 cm^{-1} elde edilen pik sp^3 (D bandını) 1585 cm^{-1} elde edilen pik ise sp^2 (G bandını) temsil etmektedir(Papageorgiou, Kinloch, & Young, 2017). Raman analizi sonuçları Ag matris içeresine Gr'nin yerleştiğini doğrulamaktadır.



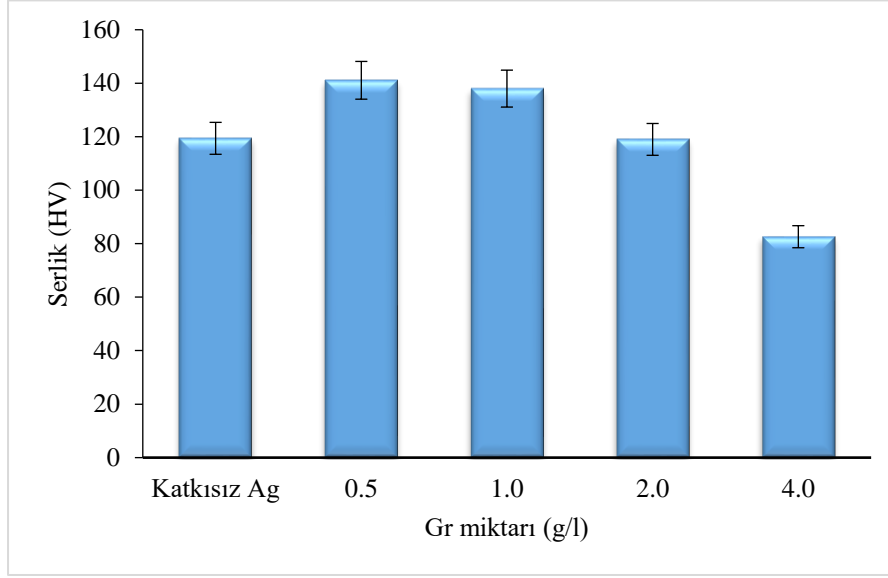
Şekil 3. Banyo Bileşimine 2.0 g/l Gr ilave edilerek üretilen kaplama tabakasının Raman analizi.

Nanokompozit kaplamaların kristalografik yönlenmesini ve banyo birleşimine ilave edilen Gr miktarının kristal yapısına etkilerini incelemek için nanokompozit tabakalar XRD ile incelenmiştir. Şekil 4’te katkısız Ag ve banyo bileşimine farklı oranlarda Gr ilave edilmiş Ag kaplamaların XRD sonuçları verilmektedir. XRD piklerinin çözümü JCPDS kart No. 04-0783’e göre yapılmıştır. XRD analizi sonuçlarında genel olarak Ag pikleri elde edilmiş Gr ait pik gözlemlenmemiştir. Bu durum yapı içerisinde Gr miktarının az olmasından kaynaklanmaktadır. XRD sonuçlarından görüleceği üzere Gr ilavesi pik şiddetlerinde düşüşe ve pik genişliklerinin artmasına neden olmuştur. Literatür incelendiğinde kaplama içerisine giren ikinci faz partiküllerinin sürekli büyüme önünde fiziksel bir engel olduğu ve kaplama esnasında yeni çekirdeklenme bölgeleri oluşturduğu belirtilmektedir (Karşioğlu & Akbulut, 2015).



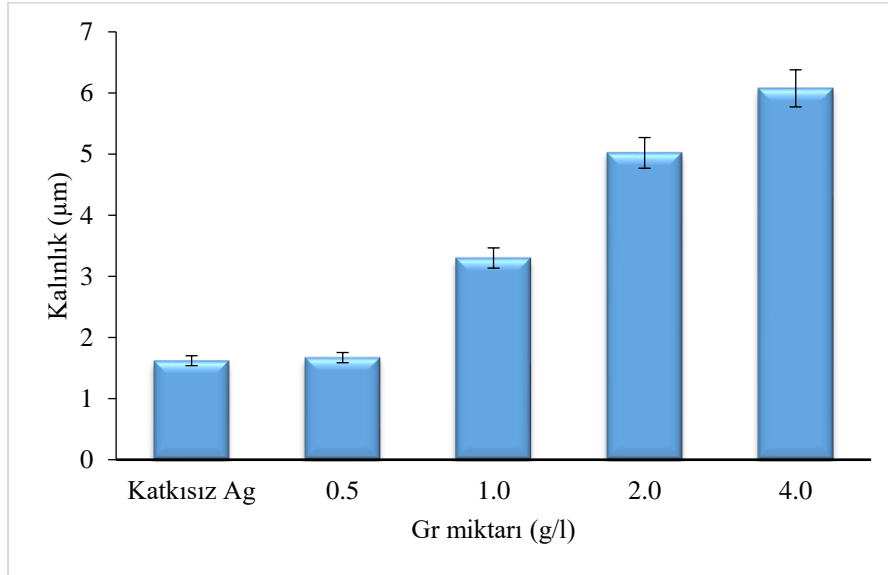
Şekil 4. Banyo bileşimine Gr ilavesinin Ag büyüme düzlemlerine etkileri.

Banyo bileşimine Gr ilavesinin nanokompozit kaplama sertliğinin etkisi şekil 5'te görölmektedir. Şekil 5 incelendiğinde 0.5 g/l kadar Gr ilavesi sertliği % 15 oranında artırmıştır. Ancak banyo bileşimine 0.5 g/l üzerindeki Gr ilavesi sertlikte düşüşe neden olmuştur. Bu düşüş banyo bileşimine ilave edilen Gr miktarının artışı ile birlikte devam etmiştir.



Şekil 5. Banyo bileşimine Gr ilavesinin nanokompozit tabasının sertliği üzerine etkileri.

Banyo bileşimine ilave edilen Gr miktarı ile birlikte üretilen kaplamaların kalınlıklarında bir artış meydana gelmiştir. Bu durumun başlıca nedeni banyo bileşimine ağırlıkça ilave edilen Gr artması dolayısı ile yapı içerisinde giren Gr'in hacim artışına neden olmasıdır. Banyo bileşimine ilave edilen Gr miktarının kaplama kalınlıklar üzerine etkileri Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6. Banyo bileşimine Gr ilavesinin nanokompozit kaplamanın kalınlığına etkileri.

4. Sonuç

Gr takviyeli Ag matrisli nanokompozit kaplamalar akımsız kaplama yöntemi kullanılarak Cu altlıklar üzerinde başarılı bir şekilde biriktirilmiştir. Bu çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Banyo bileşimine ilave edilen Gr Ag kaplama tane yapısı üzerinde belirgin bir değime neden olmuştur. Gr ilavesiz kaplama Ag matris tabakasının tane yapısı küresel iken banyo bileşimine 0.5 g/l Gr ilavesi iğnemsı yapıya, 2.0 g/l çıkması ile birlikte fleyk (yapraksı) yapıya dönüştüğü görölmüştür.

- Banyo bileşimine 4.0 g/l Gr ilavesi yapı içerisinde Gr parçacıklarının topaklanmaya (aglomerasyona) neden olduğu açıkça SEM fotoğraflarında görülmüştür.
- İlave edilen Gr miktarının artması ile birlikte nanokompozit yapı içerisindeki C elementi oranının arattığı EDS sonuçlarından gözlemlenmiştir. Yapı içerisindeki bu C elementinin Gr yapısında olduğu Raman analizi ile kesinleştirilmiştir.
- Gr ilavesinin Ag kaplamanın büyüme yönleri, XRD pik şiddetlerini düşürdüğü genişliklerini artırdığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla tane küçülmesine neden olduğu tespit edilmiştir.
- En yüksek Sertlik değeri banyo bileşimine 0.5 g/l Gr ilavesi ile elde edilmiştir.
- Banyo bileşimine ilave edilen Gr miktarının artması ile birlikte kaplama kalınlığı artmıştır.

Kaynaklar

Chen, D., Qiao, X., Qiu, X., Tan, F., Chen, J., & Jiang, R. (2010). Effect of silver nanostructures on the resistivity of electrically conductive adhesives composed of silver flakes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 21(5), 486-490. <https://doi.org/10.1007/s10854-009-9943-y>

Daoush, W. M., Lim, B. K., Mo, C. B., Nam, D. H., & Hong, S. H. (2009). Electrical and mechanical properties of carbon nanotube reinforced copper nanocomposites fabricated by electroless deposition process. *Materials Science and Engineering: A*, 513-514, 247-253. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.01.073>

He, P., Huang, S., Wang, H., Huang, Z., Hu, J., Cheng, X., & Pan, C. (2014). Electroless nickel–phosphorus plating on silicon carbide particles for metal matrix composites. *Ceramics International*, 40(10, Part B), 16653-16664. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.08.027>

Hwang, H. J., Toriyama, M., Sekino, T., & Niihara, K. (1998). In-situ fabrication of ceramic/Metal nanocomposites by reduction reaction in barium titanate–Metal oxide systems. *Journal of the European Ceramic Society*, 18(14), 2193-2199. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(98\)00154-X](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(98)00154-X)

Karshioğlu, R., & Akbulut, H. (2015). Comparison microstructure and sliding wear properties of nickel–cobalt/CNT composite coatings by DC, PC and PRC current electrodeposition. *Applied Surface Science*, 353, 615-627. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.06.161>

Krishnamoorthy, K., Kim, G.-S., & Kim, S. J. (2013). Graphene nanosheets: Ultrasound assisted synthesis and characterization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(2), 644-649. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.09.007>

Kwon, D. H., Nguyen, T. D., Dudina, D. V., Kim, J. S., Yum, Y. J., & Kwon, Y. S. (2007). Properties of Dispersion Strengthened Cu-TiB₂ Nanocomposites Prepared by Spark Plasma Sintering. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.119.63>

Mallory, G. O., & Hajdu, J. B. (1990). *Electroless Plating: Fundamentals and Applications*. William Andrew.

Manepalli, R., Stepniak, F., Bidstrup-Allen, S. A., & Kohl, P. A. (1999). Silver metallization for advanced interconnects. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 22(1), 4-8. <https://doi.org/10.1109/6040.746536>

Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2017). Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. *Progress in Materials Science*, 90, 75-127. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.07.004>

Sheng, X., Xie, D., Cai, W., Zhang, X., Zhong, L., & Zhang, H. (2015). In Situ Thermal Reduction of Graphene Nanosheets Based Poly(methyl methacrylate) Nanocomposites with Effective Reinforcements. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(2), 649-658. <https://doi.org/10.1021/ie5035978>

Wang, R., Ye, W., Ma, C., & Wang, C. (2008). Preparation and characterization of nanodiamond cores coated with a thin Ni–Zn–P alloy film. *Materials Characterization*, 59(2), 108-111. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.11.001>

Whitby, R. L. D. (2014). Chemical Control of Graphene Architecture: Tailoring Shape and Properties. *ACS Nano*, 8(10), 9733-9754. <https://doi.org/10.1021/nn504544h>



Katkısız ve Gümüş Katkılı Hidroksiapatitin Fiziksel ve Kimyasal Karakterizasyonu

Physical and Chemical Characterization of Pure and Silver Doped Hydroxyapatite

Mustafa B. Türköz¹, Ümit Erdem²

¹ Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Karabük Üniversitesi, 78050, Karabük, TÜRKİYE

² Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezi, Kırıkkale Üniversitesi, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 13/03/2019

Kabul/Accepted: 29/04/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Bu çalışmada çöktürme yöntemiyle nano boyutlu katkısız Hidroksiapatit (HAp) ve %0,05, %0,20, %0,40 (w/v) oranlarında Ag(I) iyonu katkılanmış HAp örnekleri üretilerek, bu örneklerin fiziksel ve kimyasal karakterizasyonları yapılmıştır. Kimyasal yapı ve kristalografik incelemede XRD, yüzey morfolojisi incelemesinde SEM, elementel analizde SEM-EDS ve ICP-OES, tane boyut incelemesinde Zeta Sizer, bileşen gruplarının belirlenmesinde FTIR, yoğunluk ölçümü için Archimed yöntemleri kullanılmıştır. XRD sonuçlarına göre, katkısız HAp için $2\theta=31,77$ olarak belirlenmiştir. Katkı oranlarındaki değişimin yüzey morfolojisine net bir etkisinin olmadığı SEM sonuçlarından elde edilmiştir. EDS ile Ca/P oranı katkısız HAp için 1,668 olarak bulunmuştur. SEM ve Zeta Sizer ölçümlerinden 100-500 nm aralığında tane boyutları elde edilmiştir. Üretilen örnekler için yoğunluk değeri 3,051 - 3,140 gr/cm³ olarak ölçülmüştür. Tüm bu sonuçların ışığında, üretimi yapılan katkısız ve Ag(I) katkılı örnekler literatürle uyumlu ve biyolojik çalışmalarda kullanılabilir özelliklerde olduğu anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler

"Hidroksiapatit, Gümüş, Dentin, Tübül"

Abstract

In this study, nano-sized pure HAp and 0.05%, 0.20%, 0.40% (w / v) Ag (I) ion-doped HAp samples were produced by precipitation method also physical and chemical characterization of these samples were made. According to the XRD results, $2\theta= 31.77^\circ$ for pure HAp. No significant changes were observed in the 2θ values according to the silver dopping rate. From the SEM images, it was observed that the change in the dopping rates did not have a clear effect on the surface morphology. The Ca / P ratio with the SEM were 1.6685 for HAp. The Ca / P ratio for pure HAp in ICP-OES device was found to be 1.6630. Grain size mean values of samples were measured 100-400 nm. FTIR results were consistent with the literature. From the produced samples, the density value for pure HAp was found to be 3,051 gr / cm³. It was observed that the densities of Ag (I) -HAp powders increased as the contribution ratio increased. In the light of all these results, it is understood that the pure and silver doped samples are compatible with the literature and can be used in biological studies.

Key Words

"Hydroxyapatite, Silver, Dentin, Tubule"

1. Giriş

Ağız hijyeni bilincinin eksik olması, yeme, içme alışkanlıkları ve bakteriyel metabolizmalardan kaynaklanan asit saldırıları, dişin sert dokularında mineral erimesine ve diş sağlığının bozulmasına neden olabilir (Chu, Lo, and Lin 2002, Llodra et al. 2005, Tan et al. 2010, Zhang et al. 2013). Bu olumsuz etkiler sonucunda dişte meydana gelen aşınmalar, diş tübül yüzeylerinin açılmasına sebep olarak diş hassasiyeti ve diş çürüklerinin oluşmasına yol açabilirler (Earl et al. 2011, Arnold, Prange, and Naumova 2015). Bunun sonucunda soğuk, sıcak veya dokunsal uyarıcılar ağrılara sebep olurlar (Gysi 1900, Byers and Dong 1983, Hirvonen and Narhi 1986). Dentin tübüllerindeki açıklıktan kaynaklanan ağrılarla ortaya çıkan şikâyet, ilk olarak 1964 yılında Brannstrom tarafından “dentin hassasiyeti” olarak adlandırılmıştır (Brännström and Åström 1964). Bu tanının tedavisi için kullanılan yaygın iki yöntemden birisi dentin geçirgenliğini azaltarak dentin içinde sıvı akışlarının önlenmeye çalışıldığı tübül tıkama yöntemidir (Addy and Mostafa 1988, Pashley et al. 1978). Tübül tıkama yönteminde hidroksiapatit (HAp), stronsiyum tuzları (klorür, asetat), kalsiyum sodyum fosfosilikat, kalsiyum karbonatlı ajanlar, oksalatlar, florür bileşikler ve çeşitli fonksiyonelleştirici moleküller içeren nanopartiküller kullanılmaktadır (Earl et al. 2011, Addy and Mostafa 1988, Lee, Kwon, and Kim 2008, Lavender et al. 2010, Cummins 2011, Cunha-Cruz et al. 2011, Wang et al. 2014).

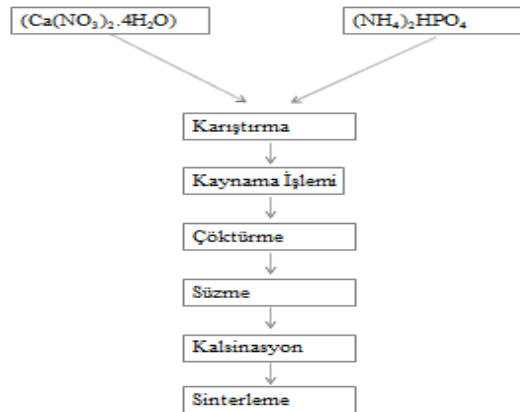
Açığa çıkan dentin tübüllerinin fonksiyonel açıklıklarını önemli ölçüde bloke edebilen veya kısmen azaltabilen ve daha sonra tübüller içindeki sıvı akışını azaltabilen biyoaktif potansiyeli olan materyaller geliştirmeye çalışılmaktadır (Arnold, Prange, and Naumova 2015, Gysi 1900, Byers and Dong 1983, Hirvonen and Narhi 1986). Diş minelerinin %95' inden fazlası HAp kristallerinden oluşur (Cummins 2011) ve dişteki dikkate değer HAp mineral oranı dentin tübüllerinin tıkanması çalışmalarında HAp'yi diğer malzemelerin önüne geçirmektedir (Chiang et al. 2010). Aynı zamanda, HAp'nin toksik olmaması, lifli bir yapısının olmaması, iltihabik bir etkisinin olmaması ve immünolojik reaksiyonlara sebep olmaması gibi biyolojik özellikleri nedeniyle tercih edilen ve kullanılabilen bir biyomalzemedir (Vallet-Regí 2006). Bununla birlikte HAp, insanın doğal kemik yapısıyla özdeş bir kimyasal yapıya ve yüksek biyouyumluluğa sahiptir (Kweh, Khor, and Cheang 1999). Bu özelliğinden dolayı HAp vücut içerisinde yapılacak uygulamalarda, vücuttaki fizyolojik sıvılar ile temas ettiğinde fizyolojik çevre ile çözünme, çökeltme ve iyon değişimi gibi kimyasal reaksiyonlar sonucunda vücut için zararlı olabilecek reaksiyon ürünleri ortaya çıkarmamaktadır. Bu durum HAp' nin kemik hücresiyle etkileşip, kemik dokusuna bağlanma yeteneği olabilen ve doğal dokunun kendi kendini tamir ettiği yapıyı taklit edebilen dinamik bir biyomalzeme olarak adlandırılmasını sağlamaktadır. Kimyasal ve fiziksel yapısından kaynaklı biyoaktif özellikleri ile mineralizasyon sürecine de katkı sağlamaktadır (Vallet-Regí 2006, Kweh, Khor, and Cheang 1999).

Bu çalışmada, diş yüzeyinin onarılmasında kullanılmak üzere, çöktürme yöntemiyle nano boyutta HAp sentezlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, çöktürme metoduyla (Addy and Mostafa 1988) nano boyutlu katkısız HAp ve %0,05, %0,20, %0,40 (w/v) oranlarında Ag(I) iyonu katkılanmış HAp örnekleri üretilerek, bu örneklerin fiziksel ve kimyasal karakterizasyon parametreleri açıklanacaktır. Fizikokimyasal karakterizasyon işlemi; kimyasal yapı ve kristalografik incelemede XRD, yüzey morfolojisi incelemesinde SEM, elementel analizde SEM-EDS ve ICP-OES, tane boyut incelemesinde Zeta Sizer ve SEM, Ca/P oranının belirlenmesinde SEM-EDS ve ICP-OES, bileşen gruplarının belirlenmesinde FTIR, yoğunluk ölçümü için Archimed yöntemi kullanılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Hidroksiapatit Tozlarının Üretimi

HAp Sentez Yöntemleri bölümünde açıklanan ve üretim süreçleri için referans alınan çöktürme metodunda (Turkoz, Atilla, and Evis 2013) Şekil 2.1'de gösterilen aşamalar uygulanarak üretim yapılmıştır.



Şekil 2.1 Reaksiyon 1 HAp üretim aşamaları

Katkısız HAp üretimi için, Ca/P = 1,67 olacak şekilde, (NH₄)₂HPO₄ ve (Ca(NO₃)₂·4H₂O) tuzları uygun oranlarda tartılarak belli bir miktar saf su eklenip, gözle görünür bir çözünme elde edilinceye kadar manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Yeterli çözünmenin elde edilmesinden sonra her iki çözelti karıştırılmıştır. Elde edilen karışım kısa bir süre kaynatıldıktan sonra 12

saat karıştırma işlemi uygulanmıştır. Karıştırma işleminden sonra oluşan süspansiyonun çökmesi için belirli bir süre bekletilmiş, sonrasında ise süzme işlemi yapılmıştır. %0,05 - %0,20 - %0,40 Ag(I) iyon katkılı HAp üretimi için, Ca-Ag/P =1,67 olacak şekilde uygun miktarlarda $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$ ve AgNO_3 kullanılmış ve katkısız HAp için geçerli aşamalar tekrarlanarak Ag katkılı Ag(I)-HAp örnekleri üretilmiştir.

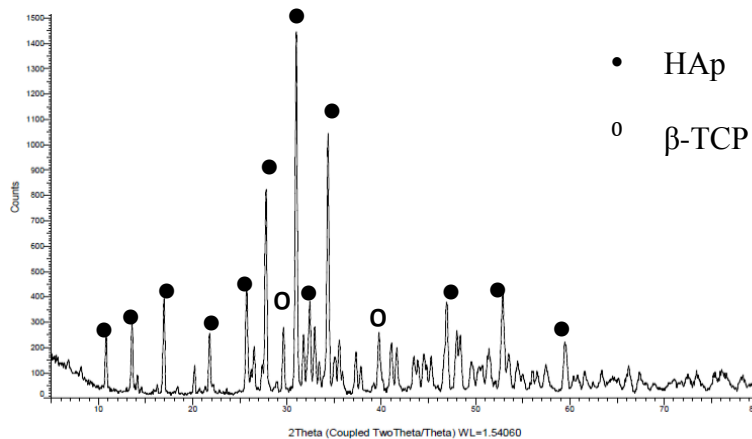
2.2 Hidroksiapatit Tozlarının Karakterizasyonu

HAp tozlarının kristalografik özelliklerinin karakterize edilmesi için, bakır (Cu) X-ışını tüpüne sahip, 40 kV ve 40 mA' da, 1,544 Å dalga boyunda ve Cu $K\alpha$ X-ışınlarına sahip XRD cihazı kullanılmıştır. XRD analizinde 2θ tarama aralığı 10° ile 80° arasında ve çözünürlük $0,1^\circ$ olarak seçilmiştir. Aynı zamanda Toz Kırınım Standartları Ortak Komitesi (JCPDS) tarafından HAp için belirlenen (JCPDS no. 09-0169 ve JCPDS no. 09-0432) dosya numarası ile tanımlanan karakteristik HAp indis değerleri her bir açı için dikkatlice incelenmiştir ve 09-0432 koduna göre referans 2θ açı değerleri kullanılarak faz tanımlama işlemi yapılmıştır. Üretilen katkısız HAp ve %0,05, %0,20, %0,40 katkı oranlı Ag(I)-HAp örneklerinin kristalografik incelemesinin yapılması amacıyla XRD çalışması yapılmıştır. Elde edilen XRD grafikleri üzerinde tepe noktalarına karşılık geldiği 2θ açı değerlerinin literatürle karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte XRD çalışmasından HAp için a ve c örgü parametreleri cihaz çıktısı olarak elde edilmiştir. Üretilen malzemenin yüzey morfolojisinin incelenmesi, tane yapıları ve boyutları ile Ca/P oranlarının belirlenmesi için SEM-EDS ve ICP-OES cihazları kullanılmıştır. SEM ile elde edilen tane boyut değerleri Zeta Sizer cihazıyla elde edilen tane boyut değerleriyle karşılaştırılmıştır. Tane boyut analizi için Zeta Sizer cihazı ile Mie Teorisi (Jones 2003) kullanılarak ISO 14887'ye uygun olarak yapılmıştır. Cihaz programıyla verilen ortalama tane boyut değerlerinin, SEM incelemesi sonucunda elde edilen değerlerle uyumluluğu değerlendirilmiştir. Bileşen gruplarının belirlenmesi için FTIR kullanılmıştır. FTIR spektroskopisi, birçok malzemenin kimyasal yapısını belirleme de kullanıldığı gibi, CaP ürünlerinin de kimyasal analizinde sıklıkla kullanılmaktadır (Ślósarczyk, Paszkiewicz, and Paluszkiwicz 2005, Destainville et al. 2003). Bu analiz sonucunda elde edilen spektrum piklerin konum, yoğunluk, genişlik ve dalga sayısı gibi bilgileri göstererek, ürünün fonksiyonel gruplarının yorumlanmasında katkı sağlamaktadır. Ayrıca örneklerin yoğunluk ölçümü için Archimed yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen yoğunluk değerlerindeki değişim, katkı oranındaki değişime göre incelenmiştir. Üretilen katkısız HAp ve Ag(I) katkılı HAp örneklerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri ISO 13779-1 (DIN Deusches Institut für Normen e.V. 2007), ASTM F1185 (ASTM 2013), ASTM E2149 (ASTM 2013) ve ABD Gıda ve İlaç İdaresi (U.S. Food and Drug Administration 1992) tarafından belirtilen kriterlere uygunluğu kontrol edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

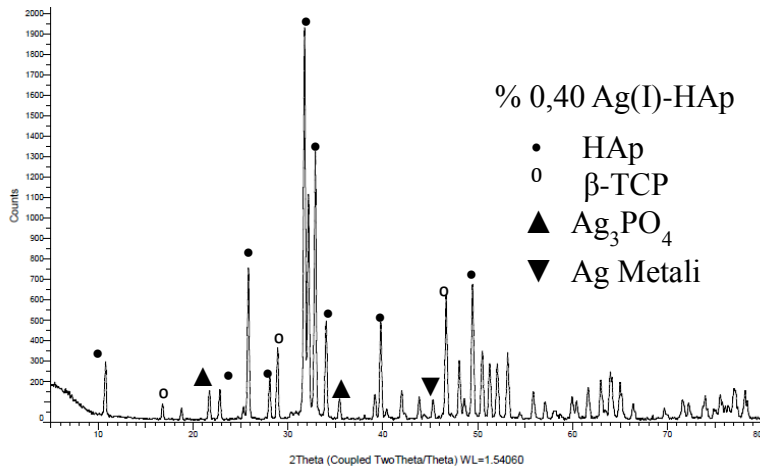
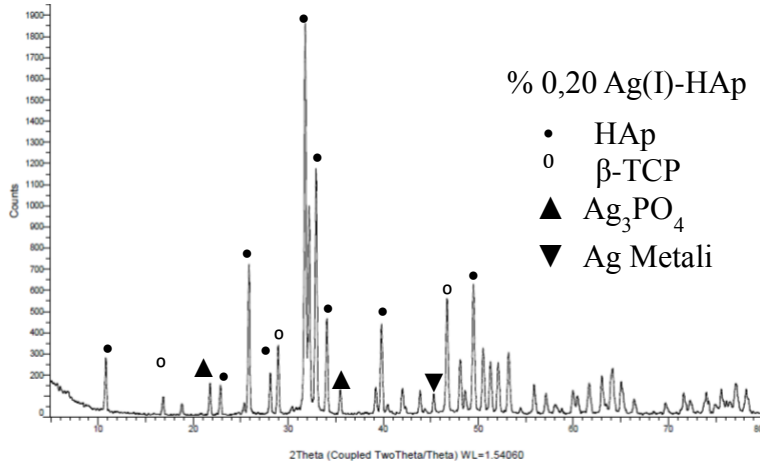
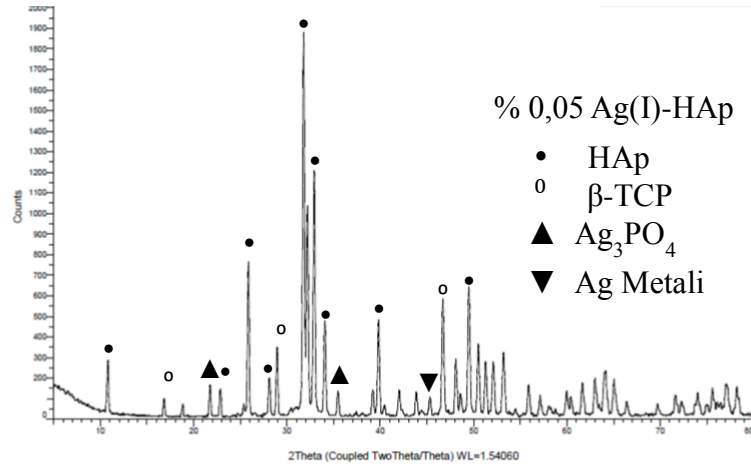
3.1 Faz Tanımlama ve Faz Safsızlığı İncelemesi

Katkısız HAp ve % 0,05, %0,20, %0,40 gümüş katkılı Ag(I)-HAp örneklerinin XRD desenleri Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de gösterilmiştir. XRD grafikleri üzerinde HAp, β -TCP, CaO, Ag ve Ag_3PO_4 için karakteristik olan 2θ açı değerleri gösterilmiştir. Katkısız HAp ve gümüş katkılı Ag(I)-HAp örneklerinin XRD desenlerinin HAp' nin sahip olduğu karakteristik XRD desenine çok benzediği bulunmuştur. Bununla birlikte sırasıyla katkısız HAp, % 0,05, % 0,20 ve %0,40 katkılı için sırasıyla $2\theta=31,77^\circ$, $31,80^\circ$, $32,02^\circ$, $31,90^\circ$ olarak elde edilmiştir. Gümüş katkılama oranına göre 2θ değerlerinde dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir. Katkılama oranlarında ciddi bir fark olmadığından 2θ değerlerinde ciddi bir fark zaten beklenmemektedir. Gümüş eklenen tüm HAp örneklerinin XRD desenlerinde gösterildiği gibi gümüş fosfat (Ag_3PO_4) ve gümüş metali (Ag) varlığı gözlenmiştir. Artan gümüş içeriği ile birlikte, Ag_3PO_4 piklerinin şiddetinde katkı oranıyla orantılı bir artış da gözlenmiştir. Bununla beraber her bir grup için $2\theta=45,31^\circ$ 'de küçük tepe noktası metal gümüşün varlığını göstermektedir. Ayrıca yaklaşık $2\theta=20^\circ$ ve 36° açı değerlerinde Ag_3PO_4 varlığı tespit edilmiştir. Alınan XRD sonuçlarına göre tüm XRD modellerinin kalsiyum fosfatlar için geçerli Uluslararası Kırılma Verileri Merkezi (ICDD) dosyaları ile tutarlı karakteristik zirvelere sahip olduğu görülmüştür. XRD analizi sonucunda üretimi yapılan HAp' nin faz safsızlığı %99,05 ($\pm 0,5$), a = 9,4263 ($\pm 0,04$) (9,4420 nm (Puajindanetr 1993)) ve c= 6,8944 ($\pm 0,04$) nm (6,8800 nm (Puajindanetr 1993)) örgü parametreleri belirlenmiştir. Kaydedilen örgü parametre değerleri ile elde edilen XRD modelleri literatürde bulunan tipik HAp karakterizasyonları ile birebir uygun olduğu görülmüştür (Kweh, Khor, and Cheang 1999, Turkoz, Atilla, and Evis 2013) (Puajindanetr 1993, Smičiklas, Onjia, and Raičević 2005).



Şekil 3.1 Üretilen HAp XRD sonucu

XRD modellerinde elde edilen sonuçlara göre HAp ve farklı gümüş katkılı Ag(I)-HAp örneklerinin hepsinde CaO'nun eser elementleri gözlemlenmemesine rağmen çok az miktarda β -TCP fazına ait pikler gözlemlenmiştir. β -TCP fazı Ag(I)-HAp' ler için HAp'den daha fazla gözlemlenmiştir. Ca'dan eksiltme olarak yapılan Ag ilavesinin bir sonucu olarak Ca oranındaki azalma ile Ag(I)-HAp' lerde HAp' den daha fazla β -TCP fazı gözlemlenmiştir. Üretim aşamalarında Ca ve P grupları öncelikle kendi aralarında çözelti haline getirilip daha sonra birbirleriyle karıştırılmaktadır. ICP-OES cihazıyla belirlenmeye çalışılan Ca ve P' nin reaktif oranlarına göre Ca ve P' nin bütünü reaksiyona girmemektedir. Reaksiyona giren Ca ve P varlığı Ca/P molar oranını sağlamaktadır. Reaksiyona girmeyen Ca ve P' lerin süzdürme işlemiyle tam uzaklaştırılmaması HAp kirliliğine neden olacaktır. Reaksiyona fazla Ca girmesi ya da fazla P girmesi yapının safsızlığını etkileyeceğinden bu durum çok istenmemektedir (Puajindanetr 1993, Hellmich, C. and Ulm 2002). Çöktürme yöntemiyle elde edilen HAp'lerde saf olmayan yapılar ya da tam HAp olmayan apatitler ısıtma sırasında ayrışır (Kweh, Khor, and Cheang 1999, Turkoz, Atilla, and Evis 2013).



Şekil 3.2 Üretilen Ag(I)-HAp XRD sonucu

Safsızlık üzerinde etkisi olduğu için istenmeyen bu durumlar aslında Ca/P molar oranı 1,67'yi aştığı ya da altında kaldığı durumlardır. Ca/P molar oranı 1,67'yi aşarsa, fazla Ca varlığı CaO oluşmasına, Ca/ P molar oranı 1,67'nin altında kalması

durumunda ise fazla P varlığı da β -TCP fazının oluşmasına neden olacaktır (Kweh, Khor, and Cheang 1999, Smičiklas, Onjia, and Raičević 2005). Bu iki sonucun ortaya çıkmaması için başlangıç reaktif oranları dikkatlice ayarlanmalıdır. Reaksiyona girmeyen Ca ve P süzdürme işlemiyle düzgün bir şekilde uzaklaştırılmalıdır. $(Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O)$, $(NH_4)_2HPO_4$, NH_3 , $AgNO_3$ ana girdi ürünlerin reaksiyonu sonucunda oluşan $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ HAp formülü, çöktürme metodu içerisinde gerçekleştirilen kurutma ve sinterleme işlemleri sonucunda $20NH_4NO_3$ ve $6H_2O$ bileşenlerinin yapıdan ayıldığını göstermektedir. Bununla beraber üretim için kullanılan ana girdi ürünlerinin safsızlığı da elde edilecek ürünün saflılığını etkileyeceğinden önemlidir. Üretilen HAp örneklerinin sahip olabileceği kirlilikler ya da yabancı iyonlar XRD analizi ile açıkça belirlenebilmektedir. Elde edilen XRD sonuçlarına göre üretim aşamasında kullanılan girdi ürünlerinde az miktarda da olsa bulunabilen sodyum (Na^{2+}), amonyum (NH_4^+), potasyum (K^+), klorür (Cl^-) ve nitrat (NO_3^-) (Hellmich, C. and Ulm 2002) gibi iyonların üretilen örneklerde bulunmadığı görülmüştür. Bu iyonlar üretilen HAp' nin safsızlığına direkt etki edebilen iyonlar olarak kristal örgü içine kolayca dâhil olabileceğinden (Kweh, Khor, and Cheang 1999, Puajindanetr 1993), XRD modelinde bulunmamaları üretim metodunun etkinliğini ve reaksiyon sentezinde kullanılan ana malzemelerin safsızlığını göstermektedir. HAp sentezlenmesi aşamasında tercih edilen çöktürme yönteminin etkinliği XRD modelinden elde edilen sonuçlarla da doğrulanmıştır.

Bu çalışma içeriğinde HAp ve farklı oranlarda Ag(I) iyonları katkılanmış Ag(I)-HAp tozları oda sıcaklığında üretilmiştir. Düşük sıcaklıklar ya da oda sıcaklığı gibi bir değerde sentezlemenin HAp saflığı üzerindeki etkisi çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda 20 ± 2 °C reaksiyon sıcaklığının önemi vurgulanmıştır (Keskin A 2000, Giuca et al. 2010, Touger-Decker and Van 2003, Hardie 1982, Verron, Bouler, and Guicheux 2012). Bu çalışma içeriğinde yapılan XRD sonuçlarına göre reaksiyon için tercih edilen laboratuvar şartlarının 20 ± 2 °C sıcaklığının uygunluğu ile HAp üretimi için kritik bir sıcaklık olduğunu görülmüştür. Tercih edilen bu sıcaklık değerleri, üretim esnasında çözeltilerin karıştırma hızlarına ve sürelerine dikkat edilmezse nihai örneklerin kalitesine doğrudan etki etmektedir. Bu sıcaklıklarda yavaş bir karıştırma hızı (100 rpm) ve kısa bir süre tercih edilirse reaksiyon gerçekleşme hızı yavaşlayacağından yabancı fazların oluşmasına neden olabileceği bildirilmiştir (Seckler et al. 2005). Üretim esnasında 12 saat gibi bir karıştırma süresinin CaO fazlarının varlığını önemli ölçüde azalttığı bilindiğinden yapılan çalışma sonucunda elde edilen XRD modelinde CaO fazının bulunmaması, tercih edilen karıştırma hızının ve süresinin uygunluğunu göstermektedir. Hızlı tercih edilen karıştırma hızının yanında çok yavaş karıştırma hızı Monetit (DCPA), Brushite (DCPD), TCP, CaO gibi fazların oluşmasına neden olduğundan (Seckler et al. 2005) karıştırma hızı ve karıştırma süresi sıcaklıkla beraber optimize edilmiştir. Çözeltilerin karıştırılmasından sonra gerçekleştirilen çöktürme süresi de nihai HAp' nin kalitesi üzerinde etki edeceğinden çöktürme işlem süresini uzun tutmak tavsiye edilmektedir (Seckler et al. 2005). Elde edilen XRD modellerine göre bu çalışma içeriğinde uygulanan 12 saatlik çöktürme süresinin yeterli bir süre olduğu sonucu elde edilmiştir. Üretim parametreleri içinde nihai HAp ürününün kalitesi üzerindeki etkili faktör kalsinasyon ve sinterleme işlemlerinde tercih edilen sıcaklıklar ve uygulama süreleridir (Seckler et al. 2005). Kurutma işleminde amaç reaksiyon sonucunda açığa çıkan uçucuların yapıdan çıkarılmasıdır. Bu kurutma işleminde en düşük sıcaklıkta uçabilecek gruba göre ayarlanmalıdır. Kurutma süresi az tercih edilen çalışmalar da yine CaO ve β -TCP gibi fazların oluşmasına neden olacağı bildirilmiştir (Seckler et al. 2005). Kurutma ve sinterleme sıcaklığı malzemenin yüzey morfolojisi üzerinde de etkili olduğundan dikkatlice optimize edilmiştir. Sinterleme sıcaklığı ve süresi malzemenin morfolojisi, tane yapısı ve tane boyutu üzerinde etkili olduğundan HAp' nin mekanik özelliklerine de etki etmektedir (Turkoz, Atilla, and Evis 2013). Bu çalışmada bu etki SEM cihazı ile morfolojik olarak incelenmiştir. XRD analizi sonucunda çalışma içeriğinde tercih edilen $200^\circ C$ ve 12 saatlik kurutma sıcaklığının ve süresinin, $1100^\circ C$ ve 1 saatlik sinterleme sıcaklığının ve süresinin uygun HAp malzemeleri elde etmek için ideal değerler olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

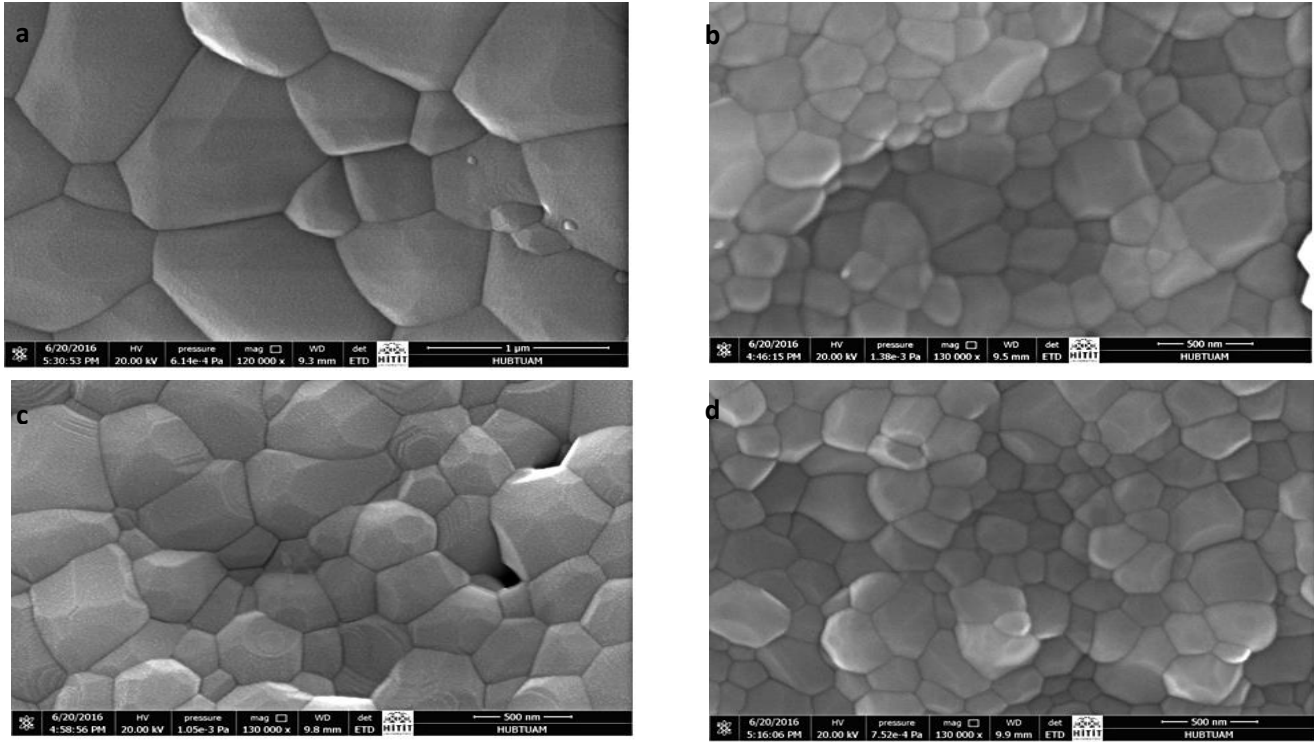
Bu çalışma içeriğinde tercih edilen çöktürme metodunda uygulanan reaksiyondaki hammaddelerin nihai ürün üzerinde etkili olmakla beraber safsızlığa etki edecek kirlenici etkilerinin çok az olduğu görülmüştür. Bununla beraber bu reaksiyonda kullanılan yüksek sinterleme sıcaklığı da nihai ürün üzerinde olabilecek kirlenmeleri ortadan kaldırması da avantajlı bir durum olarak değerlendirilmiştir. XRD piklerinin pik alanları dikkatle incelendiğinde (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2) dar zirvelere sahip bir sonuç gözlenmiştir. Dar pik alanları daha büyük kristallenmeyi geniş pik alanları ise daha az kristallenmeyi göstermektedir (Kweh, Khor, and Cheang 1999). Çalışma içeriğinde değerlendirilen HAp örneklerinin sahip olduğu dar ve uzun pik varlığı kristallenmenin uygunluğunu göstermektedir.

3.2 Yüzey Morfolojisi İncelemesi

Bu çalışmada, görüntüleme işleminde yüksek çözünürlük oluşturduğu için SEM tercih edilmiştir. Üretilen katkısız HAp ve %0,05 - %0,20 - %0,40 Ag(I) iyonları katkılanmış Ag(I)-HAp biyomalzemelerinin SEM görüntüleri Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Her iki grup için yapılan çalışma sonucunda elde edilen SEM görüntülerinde yoğun ve bal peteği desenli bir morfoloji gözlemlenmiştir. HAp' nin morfolojik olarak değerlendirmesinden beklenen az deformeli, düzgün dağılımlı, küresel ve düzenli şekilli parçacıklara sahip olduğu görülmüştür. Üretimde kullanılan çöktürme yöntemi parametreleri, her bir örnek için aynı tutulduğundan yüzey morfolojileri üzerine etki edebilecek tek etken iyon katkılama ve bu iyonların katkı oranlarıdır. Bu çalışma içeriğinde elde edilen SEM görüntülerine göre seçilen katkı oranlarındaki değişimin yüzey morfolojisine net bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Ancak bu katkı oranındaki artışın morfolojiyi değiştirmeyeceği anlamına gelmemektedir. Yüzey morfolojisinde katkılama oranına göre değişimin incelendiği bir çalışma da morfoloji değişimi için kritik bir değer tanımlanmıştır (Turkoz, Atilla, and Evis 2013). Belirtilen çalışmada Ag(I) iyonu katkılanmış HAp için %2 gibi bir değerden sonra morfolojisinin düzensiz ve tanelerde ısıl işlem izlerinin gözlemlendiği bildirilmiştir (Turkoz, Atilla, and Evis 2013). Yaptığımız çalışma için tercih edilen katkı oranları için bu denli keskin farklılıklar gözlenmemiştir.

Üretilen katkısız HAp tozlarının yüzey morfolojisi üzerine etki eden en önemli üretim parametresi sinterleme sıcaklığıdır (Kweh, Khor, and Cheang 1999). Yüzey düzgünlüğünü arttırmak için sinterleme sıcaklığı yüksek bir değer ve çöktürme süresi için en az 12 saatlik bir süre ve ideal bir Ca/P oranı seçilmesi (Kweh, Khor, and Cheang 1999; Turkoz, Atilla, and Evis 2013) gerektiği, almış olduğumuz SEM görüntüleriyle de doğrulanmıştır. $1100^\circ C$ ve 1 saat olarak ayarlanan sinterleme işlemi ile

düzenli, pürüzsüz, bal peteği desenli ve nano boyutta HAp parçacıklarının olduğu görülmüştür. HAp' nin sahip olduğu bu pürüzsüz yüzey, yüzeye yapışma ve/veya tutunma ihtimalini azaltacağından diş tedavilerinde diş yüzeyine mikroorganizmaların tutunmasını engelleyen ideal bir yüzey oluşturacaktır. Dentin tübülleri üzerine kaplama amaçlı kullanacağımız bu ürün mikroorganizmalarla ilk karşılaşacak yer olacağından yüzey pürüzlülüğünün az olması tedavinin etkinliği için çok pozitif bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

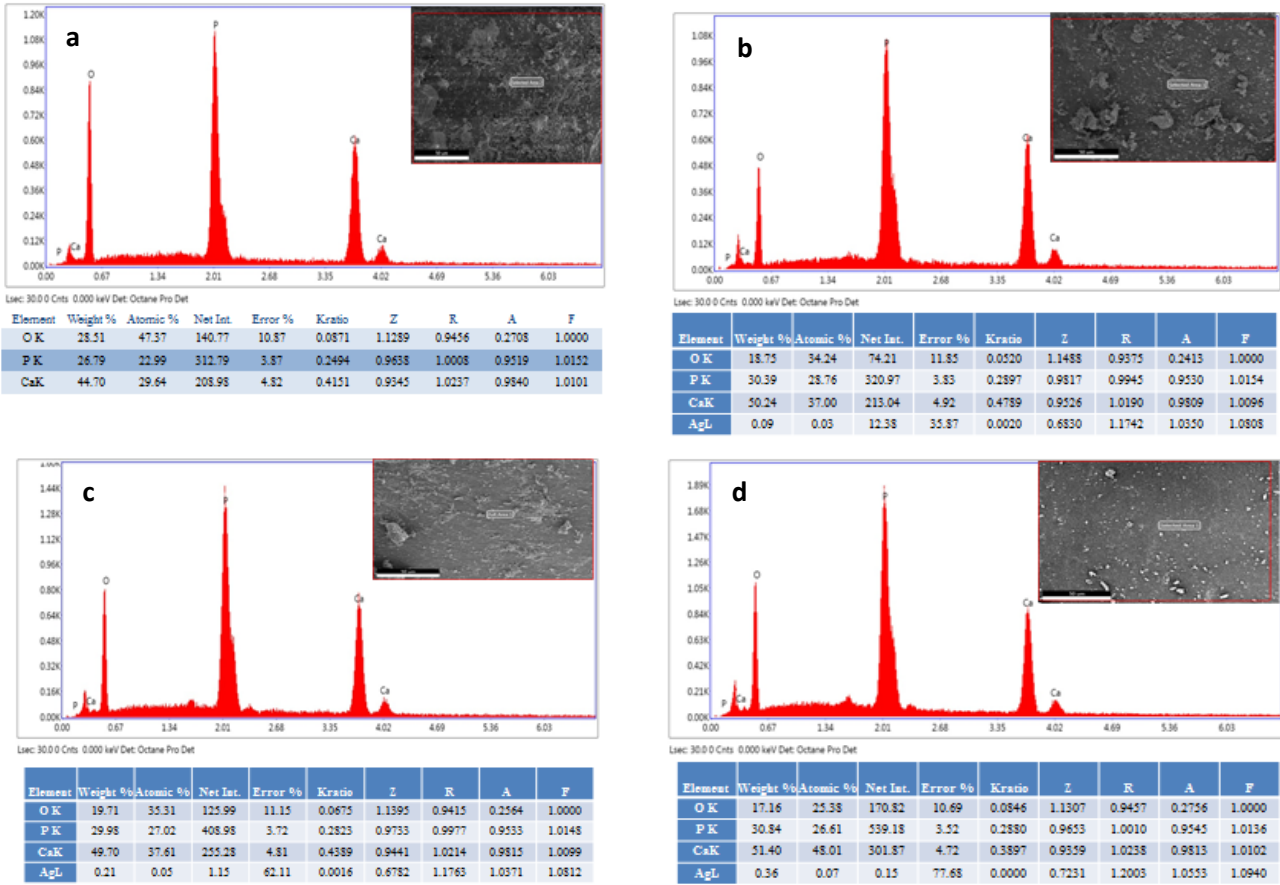


Şekil 3.3: Üretilen Katkısız (a) ve Ag(I)-HAp SEM görüntüleri b) % 0,05 c) % 0,20 d) % 0,40 Ag(I)-HAp

Bu çalışmada çökeltme işlemi için 12 saatlik bir süre uygulanmıştır. Parçacıkların çökmesi için belirlenen süre az olursa ve çökelen kısımla sıvı içerik birbirinden tam ayrılmazsa çözelti ve parçacık karışımı ile ısı işlem süreçleri başlayacaktır. Bu durumda parçacıkların çözüldüden tamamen ayrılmaması ve hızlı uygulanan ısı işlemle beraber malzemenin yüzey morfolojisi de pürüzlü hale gelecektir (Giulietti et al. 2001). Bu nedenle ısı işlem öncesi parçacıkların çözüldüden tamamen ayrılması için 12 saatlik bir çökeltme işlemi uygulanmıştır. Aynı zamanda süzdürme işleminde de yeterli bir süre beklemeyle beraber düşük vakum pompası kullanılarak daha etkin bir ayırma sağlanmaya çalışılmıştır. Normalde bütün HAp yapıları ısı işlemin başladığı ilk andan ısı işlemin bittiği son ana kadar ki sürede pürüzlüden pürüzsüz yüzeye doğru ilerlerler (Giulietti et al. 2001). İlk anda yani pürüzlü durumda moleküller daha fazla yapışma ve büyüme eğilimine sahiptirler. Isıl işlemle beraber pürüzlü yüzeyden pürüzsüz yüzeye dönüşüm başlayacaktır. Yüzey pürüzsüzleştikçe de moleküllerin eklenmesi yavaşlayacak ve nihai yapı ortaya çıkacaktır (Giulietti et al. 2001). Yaptığımız çalışmalar sonucunda elde edilen verilere göre pürüzlü yüzey olarak ortaya çıkabilecek negatif etkiyi azaltmak için ilk kurutma işlemi bir süre daha artırarak bu yan etkilerin ortadan kaldırılabileceği görülmüştür. Bu çalışmada ise çökeltme sıcaklığı laboratuvar şartlarındaki sıcaklık, kurutma sıcaklığı 200°C ve sinterleme sıcaklığı da 1100°C olarak uygulanmıştır. Reaksiyon sıcaklıklarıyla beraber ısı işlemlerin uygulandığı sürelerde malzemelerin yüzey kalitesini etkilemektedir (S. Lazić et al. 1996, Slavica Lazić et al. 2001). HAp üretim yöntem parametrelerinin faz safsızlığına etkisi XRD çalışmasında tanımlanmıştır. Ca fazlalığından CaO ve P fazlalığından da β -TCP fazlarının ortaya çıkacağı açıklanmıştır. Kalsiyum fosfat bileşiklerinden HAp, TCP' den biyolojik olarak daha etkindir (Kweh, Khor, and Cheang 1999). Bu çalışma içeriğinde dentin tübül yüzeylerine kaplama hedefi, biyolojik bir yüzeye kaplama işlemi olduğundan HAp' nin sahip olduğu Ca/P değerleri safsızlığı da göstermek için ayrıca belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada Ca/P oranı SEM-EDS kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Ölçümlerde 50 μ m ölçek değerinde alınan genel SEM görüntüsünde yaklaşık 200 μ m²'lik bir alan seçilerek ölçümleme yapılmıştır. Katkısız HAp ve Ag(I)-HAp' lere ait SEM-EDS spektrumları ve sonuçları sırasıyla Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Aynı zamanda bütün gruplar için elde edilen Ca/P oranları Çizelge 3.1'de görülmektedir.

Çizelge 3.1 Ca/P değerleri

Örnek	Ca	P	Ca/P
Katkısız HAp	44,70	26,79	1,6685
% 0,05 Ag(I)-HAp	50,24	30,39	1,6531
% 0,20 Ag(I)-HAp	49,70	29,98	1,6577
% 0,40 Ag(I)-HAp	51,40	30,84	1,6666



Şekil 3.4 Üretilen Katkısız (a) ve Ag(I)-HAP, SEM-EDS Spektrumları, b) % 0,05 c) % 0,20 d) % 0,40 Ag(I)-HAP

SEM-EDS çalışmaları sonucunda elde edilen spektrumlarından sağlanan verilerle hazırlanan Çizelge 3.1 incelendiğinde kalsiyum fosfat seramikleri için tanımlanan (S. Lazić et al. 1996, Slavica Lazić et al. 2001, Touger-Decker and Van 2003, Verron, Bouler, and Guicheux 2012, Dorozhkin 2010) Ca/P oranları elde edilmiştir. Bu sonuçlarda hem XRD hem de FTIR analizlerinden elde edildiği gibi katkısız HAP mineralini göstermektedir. Üretimde elde edilen bu değer diş dentin tübül hassasiyet tedavilerinde kullanımı düşünülen HAP için istenen bir Ca/P değeridir. Ancak bu şekilde belirlenen Ca/P değeri uygulanan metodun geçerliliği açısından düşündürücüdür. Yani SEM-EDS analizinde seçilen bölgeye göre veri alımı olduğu için aslında örneğin bütünü temsil etmemektedir. Tekrarlı yapılan ölçümler sonucunda alınan ortalama değerle malzemelerin Ca/P oranları hakkında bilgi edinmemizi sağlamaktadır. Bu olumsuz yaklaşımı ICP-OES cihazıyla bütün malzemenin sahip olduğu Ca, P değerlerini miktar olarak belirleyerek aşılabileceği düşünüldüğü için EDS ölçümlerini doğrulamak adına ICP-OES cihazıyla Ca/P oranını belirlenmeye çalışılmıştır. ICP-OES cihazıyla elde edilen Ca, P değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Bu işlem tekrarıyla bütün olarak bir HAP yapısının varlığı da doğrulanmış olacaktır. Hem daha gerçekçi bir Ca/P değeri hem de yapıyı bütün olarak skorlamak verilerin doğru kaydedilmesi açısından önemlidir.

Burada ICP-OES cihazıyla yapılan ölçümlerden alınan sonuçlardan sadece katkısız HAP için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Katkısız HAP tozu için elde edilen Ca, P değerleri sırasıyla 1,821 ppm ve 1,095 ppm olarak ölçülmüştür. Bu değerler sonucunda elde edilen Ca/P oranı 1,6630 olarak bulunmuştur. SEM-EDS sonucundan elde edilen 1,6685 Ca/P değeriyle oldukça uyumludur. Bölgesel ve seçime bağlı alınan EDS ölçümlerinden alınan sonucun ICP-OES gibi bütünü miktar olarak belirleyen çalışmayla uyumlu çıkması tamamen bir HAP yapısının varlığını göstermektedir.

Çizelge 3.2 Katkısız HAP, ICP-OES Sonucu

Ölçüm	Sonuç (ppm)		
1	1148990	1.111	1.882
2	1145730	1.095	1.818
3	1145560	1.080	1.823
Ortalama	1146760	1.095	1.821
	Ar 430.010	P 177.495	Ca 317.993

Sonuç olarak çöktürme yöntemiyle sentezlenen katkısız HAP ve Ag(I)-HAP biyomalzemeler bal peteği desenli ve düzenli şekilli, yüzeyleri pürüzsüz parçacıklara sahiptir. Elde edilen bu morfoloji ve Ca/P değerleri üretilen bu biyomalzemelerin yüksek reaksiyon sıcaklıklarında, uzun çökeltme zamanlarında üretildiğinin de bir göstergesi olmuştur. Bu biyomalzemeler morfolojik olarak yüzey pürüzlüğü gibi negatif bir etki doğuracak özelliğe sahip olmadığından ve Ca/P oranıyla HAP fazını

net bir şekilde doğruladığından bu haliyle diş dentin tübülleri hassasiyet çalışmalarında kaplama malzemesi olarak kullanılmasının uygun olduğu sonucu elde edilmiştir.

3.3 Tane Boyutu İncelemesi

Üretilen katkısız HAp ve farklı katkı oranlı Ag(I)-HAp örneklerin tane boyutları, SEM ve Zeta Sizer cihazı ölçüm sistemleri kullanılarak belirlenmiştir. Ölçülen tane boyutları ve ortalama tane boyutu değerleri çizelge halinde listelenmiştir. Bununla beraber Zeta Sizer cihazıyla yapılan ölçüm sonuçları her bir örnek için Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Hem SEM cihazı hem de Zeta Sizer cihazıyla yapılan tane boyut ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Tane boyut dağılımları üzerindeki dikkate değer değişim, malzemenin mekanik özelliklerini değiştireceğinden katkısız HAp ve farklı katkı oranlı Ag(I)-HAp örnekleri kendi aralarında değerlendirilerek iyon katkılamanın etkileri incelenmiştir.

SEM cihazıyla görüntüler üzerinden rastgele 10 ölçüm sonucunda elde edilen tane boyut değerleri yaklaşık 100–500 nm aralığındadır (Çizelge 3.3). Elde edilen bu tane boyut değerleri hem kendi içinde hem de gruplar içinde değerlendirildiğinde nano boyutta tane boyut değerleri elde edilmiştir. Çöktürme yoluyla yapılan üretimde tercih edilen kurutma ve sinterleme sıcaklığı malzemelerin tane boyutlarının dağılımı üzerinde pozitif bir etki göstermiştir. Dentin tübülleri üzerinde kaplanabilen bir malzeme üretme hedefi için ana kriter olan nano boyutta malzeme sentezleme hedefinin gerçekleştiği bu sonuçlarla doğrulanmıştır. SEM ölçümlerinde görüntü alınan yerden tane boyut değerlendirmesi yapıldığı için rastgelelik içeren bir sonuç vardır. Yani analiz edilen bölgedeki dağılım tüm malzeme dağılımı için fikir verse de kesin bir sonuç vermemektedir. Bu nedenle üretilen katkısız HAp ve farklı katkı oranlı Ag(I)-HAp örneklerinin tane boyutları Zeta Sizer cihazıyla da ölçülmüştür. Zeta Sizer cihazında konulan madde miktarındaki bütün tanelerin tane boyut dağılımını belirlediğinden genel tane boyut dağılımı için daha iyi bir fikir elde etmeyi sağlamaktadır. Ölçümler sonucunda elde edilen tane boyut dağılımları Şekil 3.5’de gösterildiği gibidir. Cihaz çıktısı olarak verilen sonuç ortalama bir tane boyut dağılımını göstermektedir.

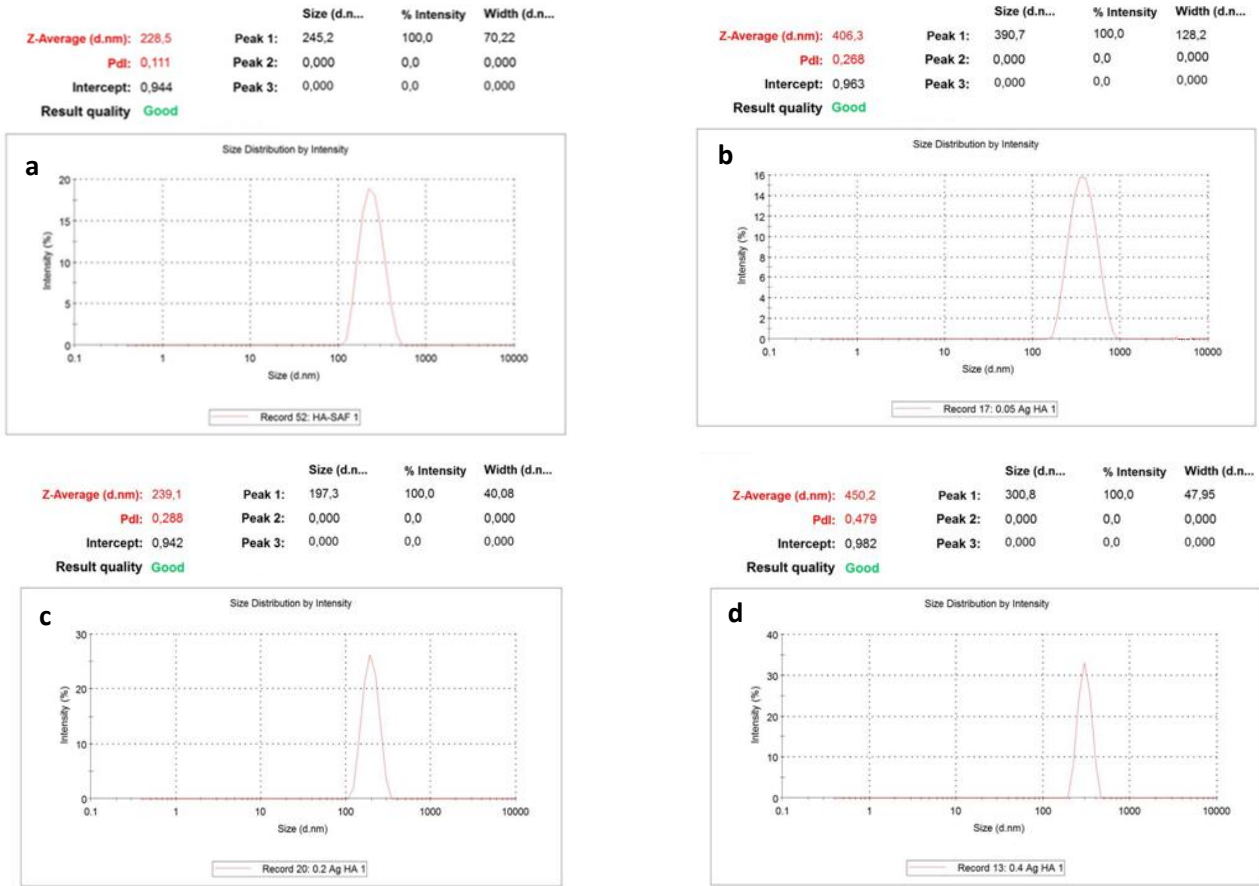
Çizelge 3.3 SEM’den Elde Edilen Tane Boyut Ölçümleri.

Numune	Ölçüm (nm)										Ortalama
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Katkısız HAp	226	313	322	210	185	233	230	153	228	183	228
% 0,05 Ag(I)-HAp	206	112	282	263	338	149	445	212	173	228	240
% 0,20 Ag(I)-HAp	239	196	113	322	241	303	400	369	253	120	256
% 0,40 Ag(I)-HAp	395	177	513	302	186	408	466	376	392	475	369

Zeta Sizer sonuçlarında katkısız HAp için 111 nm, %0,05 Ag(I)-HAp için 268 nm, %0,20 Ag(I)-HAp için 288 nm ve %0,40 Ag(I)-HAp için 479 nm ortalama tane boyut değerleri elde edilmiştir. Ca’dan eksiltme olarak uygulanan gümüş katkılama Ca oranını azalttığından Ag(I) iyonu ilavesi ile tane boyutlarının küçülmesi beklenmektedir (Turkoz, Atilla, and Evis 2013). Bu haliyle katkı oranlarındaki artışa göre tane boyutlarının büyüdüğü sonucuna ulaşılmıştır. Ancak buradan, artan katkı oranı tane boyut dağılımını artırır sonucuna ulaşamayacağı düşünülmüştür. Çünkü böyle bir sonuç ifade edebilmek için malzeme yoğunluklarının da bilinmesi gerekmektedir. Yoğunluk artması malzemelerin aynı hacme daha fazla tane girmesi olduğundan normalde beklenen tane boyutların azalmasıdır. Fakat burada Zeta Sizer’ da gözlenen tane boyut değerindeki artış cihazda kullanılan ölçüm tekniğiyle de ilişkilendirilebilir. Analiz süresi boyunca HAp tozlarının topaklaşması analiz etkinliğini sorgulamamıza neden olmaktadır. Topaklaşmayla beraber cihaz daha yüksek bir tane boyutu değeri okuyacaktır. Ancak bu çalışmada tercih edilen katkı oranları bu etkinin net olarak gözlemlenmesi için yeterli oranlar değildir. Bu etkinin net olarak gözlemlenmesi için daha yüksek oranlı katkı tercih edilmelidir.

İlk bakışta bu farklı değerler, hem iyon katkılamanın hem de iyon katkı oranlarındaki değişimin tane boyut dağılımı üzerinde etkisinin var olduğu şeklinde yorumlansa da çalışma içeriğinde hedeflenen 1-2 µm’lik dentin tübülleri için bütün değerler uygun olduğundan bu dağılım farkı önemli olarak değerlendirilmemiştir. Tane boyut dağılımı üzerinde malzeme yoğunlukları da etkilidir. Çünkü Zeta sizer ölçümlerinde kullanılan ortam yoğunluğu her malzeme için aynıdır. Fakat her malzemenin kendi yoğunluğu aynı değildir. Bu nedenle bu tane boyut dağılımları malzeme yoğunlukları da dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Yoğunluk ölçümlerinde daha detaylı tartışılacak olsa da malzeme yoğunluklarında değişimin çok büyük olmaması da Zeta Sizer’ daki tane boyut ölçümünde göreceli bir artışı göz ardı etmemize sebep olmuştur. Zeta Sizer ölçümleri esnasında hem katkısız HAp hem de farklı katkı oranlı Ag(I)-HAp örneklerinde gözlemlenen hızlı topaklaşma analiz için dikkate değer bir sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle Zeta Sizer ölçümlerinde HAp’ den daha yoğun bir sıvı ortamı kullanıp, bu sıvı içinde en az 30 dakika sonike işlemi analizin verimliliği açısından önemli olarak değerlendirilmiştir. Çöktürme yöntemiyle sentezlenmiş HAp ve Ag(I)-HAp’lerin sahip oldukları 100–500 nm aralığındaki tane boyut değerlerinin FDA tarafından biyolojik uygulamalarda kullanılacak CaP biyoseramik ürünleri için tanımlanan tane boyut dağılımlarını açık bir şekilde sağladığı görülmüştür. Çöktürme yoluyla üretilen HAp ve %0,05 - %0,20 - %0,40 Ag(I)-HAp tozlarının çöktürme işlem parametrelerinin elde edilen nihai HAp özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde üretilen katkısız HAp tozlarının arzu edilen özelliklere ulaşmış olmasının

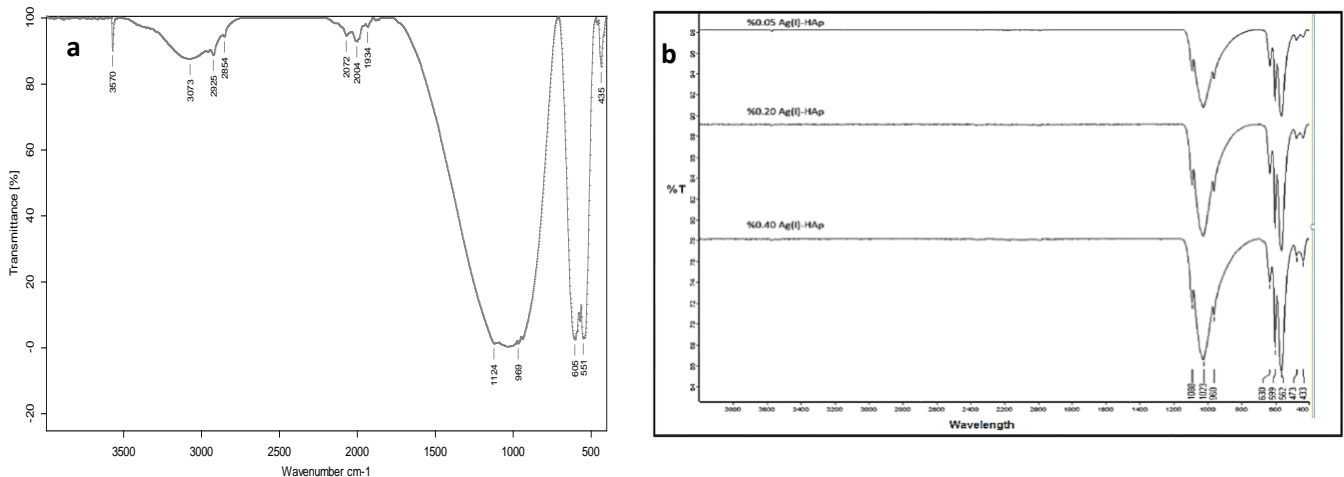
çöktürme işlemi parametresine büyük ölçüde bağlı olduğu belirlenmiştir. Dişte dentin tübül hassasiyet giderme çalışmalarında dentin tübül tıkama amaçlı kullanımı hedeflenen HAp ve %0,05 - %0,20 - %0,40 Ag(I)-HAp tozlarının faz saflılığının ve bileşen gruplarının, yoğunluğunun, yüzey morfolojisinin ve tane boyutlarının, Ca/P oranının biyolojik uygulamalar için gerekli olan kriterleri sağladığı görülmüştür.



Şekil 3.5 Üretilen Katkısız (a) ve Ag(I)-HAp Zeta Sizer Sonuçları b) %0,05, c) %0,20, d) %0,40 Ag(I)-HAp

3.4 Bileşen Grupları İncelemesi

Çöktürme yöntemiyle üretilen katkısız HAp ve katkılı Ag(I)-HAp' nin sahip olduğu PO_4^{3-} , OH^- , CO_3^{2-} , HPO_4^{2-} bileşen gruplarının belirlenmesinde FTIR analizi kullanılmıştır. Bu analizlerde elde edilen spektrumlar HAp ve Ag(I)-HAp için Şekil 3.6'da gösterilmiştir. FTIR çalışması sonucunda elde edilen spektrumlara göre PO_4^{3-} grupları sahip oldukları dalga boyu değerleriyle üretilen HAp' nin hem HAp fazınının hem de XRD sonucuyla örtüşecek şekilde çok az miktarda β -TCP fazının varlığını göstermektedir. Bükme titreşimi (ν_2) 477 cm^{-1} , O-P-O bükme titreşimi (ν_4) 571 ve 603 cm^{-1} , P-O arasında simetrik gerilme titreşimi (ν_1) 969 cm^{-1} , P-O arasında asimetrik gerilme titreşimi (ν_3) 1037 ve 1100 cm^{-1} , OH titreşim (ν_1) ve gerilme (ν_s) titreşimleri 640 ve 3570 cm^{-1} dalga boylarında gözlemlenmiştir. 3600 ila 2600 cm^{-1} dalga boyu değerlerinde gözlemlenmesi beklenen su bandına ait piklerde gözlemlenmiştir.



Şekil 3.6 Üretilen Katkısız (a) ve Ag(I)-HAp (b) FTIR Sonuçları

HAp'nin temel yapısı içinde karbonat iyonlarının bulunması beklenmemesine rağmen sentez koşullarına bağlı olarak, CO₂'nin suda çözünmesi ve sonuçta meydana gelen karbonat iyonlarının kristal kafes içine dâhil edilmesi nedeniyle çoğu zaman karbonat içeren bir HAp elde edilir (Destainville et al. 2003). PO₄³⁻ grubunun CO₃²⁻ grubuna bağlanmasını gösteren soğurma CO₃²⁻ pikleri 1700 cm⁻¹ dalga boyu aralığında gözlemlenmiştir. Zayıf şiddetli PO₄³⁻, asimetrik gerilme titreşimi (ν₃) ve simetrik gerilme titreşimi (ν₁) emme bantları 1934 ve 2072 cm⁻¹ dalga boyu aralığında gözlemlenmiştir. Bununla birlikte HAp ve Ag(I)-HAp için sırasıyla 432 cm⁻¹ ve 1127 cm⁻¹, 433 cm⁻¹ ve 1132 cm⁻¹ dalga boylarında çok az bir pik şiddetiyle β-TCP fazına ait olan pikler de gözlemlenmiştir. Üretim sonucunda elde edilen ürünün FTIR sonuçlarında gözlemlenen β-TCP fazı XRD sonuçlarıyla uyumludur. Farklı katkı oranlı Ag(I) iyonları eklenerek üretimi yapılan Ag(I)-HAp tozları için yapılan FTIR çalışmalarında da HAp için yapılan FTIR analiziyle uyumlu bileşen grupları bulunmuştur. Sentezlenen HAp ve Ag(I)-HAp tozlarına ait kimyasal bağlarının soğurulma bantları için elde edilen spektrum değerleri literatür değerleriyle kıyaslanarak Çizelge 3.4' de gösterilmiştir. Elde edilen dalga boyu değerleri HAp ve Ag(I)-HAp için geçerli pik noktalarıyla uyumludur.

Çöktürme yöntemiyle üretilen HAp' lerde emilen suyun çıkarılması için kalsinasyon işlemi ve katkısız HAp fazının oluşması için sinterleme işlemi uygulanmaktadır. Bu işlemlerde ki uygunsuzluklar XRD analizinde olduğu gibi FTIR analizinde de gözlemlenmektedir. Kurutma işlemi süresi ve sıcaklık değerlerinde ki hatalar FTIR analizlerinde su varlığını gösteren dalga boyu noktalarında açığa çıkmaktadır. HAp tozlarının FTIR analizlerinde çok az miktarda su varlığını gösteren pikler gözlemlenmiştir. Ancak bu su varlığı üretimle birlikte FTIR analizinde tercih edilen analiz yönteminden de olabilir. FTIR analizi için örnekler, toz halinde kullanılabileceği gibi, tozların KBr ile karıştırarak hazırlanan pelletlerin kullanılarak ölçümün yapılması da mümkündür. Bu çalışmada KBr pellet hazırlanarak analizler yapılmıştır. Bu örnek hazırlama yönteminin, hazırlanan pelletin kalınlığının her ölçüm için birbirine yakın hazırlanması, KBr içine katılan örneğin homojen dağılması gibi bazı dezavantajları olsa da madde miktarının sabit ayarlanması, gelen ışığın örnek üzerine daha iyi odaklanması gibi avantajları nedeniyle analizin güvenilirliğine pozitif katkı sağlamaktadır. Yapmış olduğumuz analizler sırasında gözlemlenen su soğurma bandı KBr' nin ortamdan su moleküllerini çekmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun sonucu olarak spektrumda su bantları oluşturmuştur. Normalde HAp analizlerinde de az bir miktar soğurulan su varlığı gözlemlense de KBr ile yapılan pelletleme sonucunda bu su varlığı artmıştır. Bu su bantlarının ortadan kaldırılması için hazırlanan pelletler belli bir süre kurutma işlemine tabi tutularak ve özel hermetik kaplarda analiz öncesi bekletilirse, adsorbe edilen geniş su bantları daraltılabilir. Ag(I)-HAp'lerde analiz için hazırlanan pelletler 35 °C sıcaklıkta ve yaklaşık 20 dakika süreyle etüvde bekletilerek FTIR analizleri yapılmıştır. Bunun sonucunda yoğun su soğurma bantları gözlemlenmemiştir (Şekil 3.6).

Hem üretim esnasında hem de karakterizasyon aşamalarında soğurulan suyun kaybedilmesi kafes parametrelerini etkilememektedir (Destainville et al. 2003). FTIR analizlerinde üretilen HAp' ler için sentez parametrelerinden ve safsızlıklarından kaynaklanan H₂O grubu pikleri gözükse de NO₃⁻ ve NH₄⁺ gruplarına ait pikler gözlemlenmemiştir. Sentez parametreleri ve safsızlık kaynaklı piklerin var olması nihai ürün için negatif bir etki olarak düşünülmektedir (Destainville et al. 2003). Bu nedenle XRD sonuçları üzerinde etkili olmayacaktır. Yani malzemenin yapısında ve faz safsızlığında bir değişime neden olmayacaktır. Ancak bu grupların varlığının biyolojik uygulamalar için önemli olduğunu düşünülmektedir. Bu uçucuların varlığının biyolojik uygulamalarda oluşabilecek reaksiyonlar nedeniyle ortadan kaldırılması önemli olarak değerlendirilmektedir. Yapılan bu çalışmada su grubu gözlemlenmişken amonyum ve diğer uçucu grupları gözlemlenmemiştir. Üretim aşamalarında uygulanan sinterleme ısıl işlemindeki farklılıklar da CaP seramiklerinin faz safsızlığına, faz türüne ve örnek tane boyutuna etki etmektedir. Bu etkiler XRD analizinde gözlemlendiği gibi FTIR analizinde de gözlemlenebilir. Üretim esnasında kullanılan ısıl işlem sıcaklığının ve süresinin bir sonucu olarak amonyumun kalıntıları da bazen bileşen grupları içinde gözlenebilmektedir. 1320 -1480 cm⁻¹ dalga boyları arasındaki bölgede karakteristik amonyum zirvelerin gözlemlenmemesi ısıl işlem sonucu bu grubun yapıdan uzaklaştığı şeklinde değerlendirilmiştir. Üretimini yapmış olduğumuz HAp tozları için yapılan FTIR analizinde çok az β-TCP fazına ait olan dalga boyu değeri gözlemlenmiştir. Bu da XRD ile elde edilen sonucu destekleyici bir bilgi olarak not edilmiştir. Bu fazın varlığı, Ca grubunun çözeltisinin hazırlanmasında yapılan karıştırma süresi, hızı ve ana bileşenlerin safsızlığı ile ilgili bir eksiklikten kaynaklandığı düşünülmüştür.

Çizelge 3.4 HAp FTIR Sonuçları

Bileşen Grubu	Soğurma Bandı, cm ⁻¹		
	Referans	HAp	Ag(I)-HAp
CO ₃ ²⁻	1640, 1650	1700	1695
	460, 474	477	473
	560 ve 600	571 ve 603	562 ve 599
	571 ve 604		
PO ₄ ³⁻	960, 961	969	960
	1020 ve 1120	1037 ve 1100	1023 ve 1088
	1046 ve 1090		
	1950-2100		
OH ⁻	630 ve 3540	640 ve 3570	3580
	631 ve 3572		
HPO ₄ ²⁻	875	-	-
Soğurulan Su	3600, 3600	2600 - 3600	2600-3600

FTIR, biyolojik uygulamalarda sıklıkla tercih edilen saf ve termal olarak kararlı bir HAp ve β-TCP elde etmek için sentez parametrelerini değerlendirmemize yardımcı olan bir analiz yöntemidir (Destainville et al. 2003). FTIR sonuçlarından elde

edilen bilgilere göre HAp tozlarının karakteristik özelliklerinin sağlanması için ana girdi ürünlerin yüksek düzeyde saf olması gerektiği anlaşılmıştır. Ayrıca istenen ürünü elde etmek için malzemenin ısıtma süreçlerinde tercih edilen sıcaklık ve sürelerin dikkatle seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte yapmış olduğumuz üretimde elde edilen ürünlerden alınan FTIR analiz sonuçlarına göre kurutma sıcaklığı ve süresinin koşullarının yoğun HAp yapısının elde edilmesi için ideal değerler olduğu sonucu elde edilmiştir. Çöktürme yöntemiyle sentezlenmiş HAp ve Ag(I)-HAp'lerin fazlara göre sahip oldukları bileşen gruplarını belirlemek amacıyla kullanılan FTIR analiz sonuçlarıyla da FDA tarafından biyolojik uygulamalarda kullanılacak CaP biyoseramik ürünleri için tanımlanan özellikleri sağladığı görülmüştür.

3.5 Yoğunluk İncelemesi

Üretilen HAp tozlarının karakteristik özelliklerinden olan yoğunluk değerinin belirlenmesi için Archimed yöntemi kullanılmıştır (Turkoz, Atilla, and Evis 2013). Yapılan yoğunluk ölçümleri ile ilgili sonuçlar Çizelge 3.5' de gösterilmiştir. Malzemelerin görelî yoğunluk değerleri deneysel olarak ölçülen yoğunluk değerinin teorik olarak bilinen yoğunluk değerine bölünmesi ile hesaplanmıştır (Katkısız HAp teorik yoğunluğu 3.156 g/cm^3 (Turkoz, Atilla, and Evis 2013)). Elde edilen yoğunluk ölçüm sonuçlarına göre çöktürme yöntemiyle üretilen katkısız HAp örneklerinin yoğunluk değeri $3,051 \text{ gr/cm}^3$ ve görelî yoğunluğu %96,673 olarak belirlenmiştir. Üretimi yapılan katkısız HAp örneklerinin katkısız HAp için tanımlı teorik yoğunluk değeri olan $3,156 \text{ gr/cm}^3$ değerine kıyasla daha az yoğunur. Farklı katkı oranlarında %0,05 - %0,20 - %0,40 Ag(I) iyonları katkılanmış Ag(I)-HAp örnekleri için sırasıyla $3,089$ – $3,112$ – $3,140 \text{ gr/cm}^3$ olarak yoğunluk değerleri ölçülmüştür. Katkı oranı arttıkça Ag(I)-HAp tozlarının yoğunluklarının arttığı görülmektedir. Yapılan yoğunluk ölçümlerinde malzemelerin yoğunlukları hacimlerinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Archimed metodunda sabit kütle olarak ayarlanan örnekler önce hassas terazide ölçümlenmiş daha sonra aynı kütlelere sahip örnekler ayrı ayrı su içine daldırılarak, sudaki hacim artışı gözlemlenmiştir. Hem katkısız hem de farklı Ag(I) iyonları katkılanmış Ag(I)-HAp örneklerinin sabit basınç ve sabit sıcaklık altında, sabit kütleler kullanılarak yoğunluklar belirlenmeye çalışıldığından yoğunluk sonuçlarındaki farklılık ölçülen örneklerin hacimlerindeki değişimden kaynaklanmaktadır. Yani aynı kütleyle sahip olan örneklerden farklı hacim değerleri sağlamıştır. Bu da artan yoğunluk değerine göre aynı kütlede azalan bir hacim ortaya çıkarmaktadır. Katkısız HAp'ye yapılan iyon katkılanmayla beraber kapladığı hacim azalmış ve daha yoğun bir malzeme haline gelmiştir. Aynı şekilde farklı Ag(I) iyonları katkılanmış Ag(I)-HAp örneklerde de artan katkı oranıyla beraber azalan bir hacim değeriyle daha yoğun bir malzeme elde edilmiştir.

Seramik biyomalzemeler için sabit kütlede, katı kütle yoğunluğundaki artış gözenekli yapının azalmaya başladığı ve hacmi oluşturan tanelerin birbirine daha sıkı halde yaklaştığı şeklinde yorumlanmıştır. Aynı şekilde üretilen katkısız hem de farklı Ag(I) iyonları katkılanmış Ag(I)-HAp örneklerin daha sıkı bir paketlenme göstererek yoğunluk değerlerinde artma olmuştur. Ancak katkı oranı arttıkça bu sıkı paketlenmenin süreklî artacağı anlamına gelmemelidir. Mustafa ve arkadaşlarının (Turkoz, Atilla, and Evis 2013) yaptığı çalışmada yoğunluk değerlerinde belli bir kritik katkı oranı değerine kadar yoğunluk değerinde artış gözlenmişken, her iyon için farklı olan kritik katkı oranı değeri aşıldıkça malzeme yoğunlukları azalmaya başlamıştır. Bu azalış yapıya tutunmaların azaldığı şeklinde değerlendirilmiştir. Yapmış olduğumuz çalışmadan elde edilen sonuçlara göre seçilen maksimum katkı oranında bile yoğunluk için bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış sonucunda elde edilen bütün yoğunluk değerleri HAp'nin biyolojik uygulamalarında istenen $3,00$ – $3,22 \text{ gr/cm}^3$ (Turkoz, Atilla, and Evis 2013) değerleri aralığındadır. Teorik olarak biyolojik uygulamalar için tarif edilen değerlerin içinde yoğunluk sonuçlarının elde edilmesi bu çalışma içerisinde uygulanan üretim metodunun etkinliğini göstermiştir.

Çizelge 3.5 Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Örnek	Sinterlenmiş Yoğunluk (g/cm^3)	Görelî Yoğunluk (%)
HAp	3,051	96,673
%0,05 Ag(I)-HAp	3,089	97,877
%0,20 Ag(I)-HAp	3,112	98,605
%0,40 Ag(I)-HAp	3,140	99,493

Bu çalışma içerisinde karşılaştırılan katı maddelerin sabit kütlede hacmindeki azalma tane boyutlarındaki değişimle de açıklanmaya çalışılmıştır. Artan yoğunluk değerleri sonucunda azalan tane boyutları boyutsal olarak biyolojik uygulamalar için kabul edilebilir bir sonuç olsa da azalan boyut değerleriyle malzemenin bozunma olasılığının artması istenen bir durum değildir. Bu nedenle ideal bir yoğunluk ve tane boyut değeri yakalanmalıdır. Yoğunluk değerlerindeki değişimler malzemelerin tane boyutları ve morfolojisi üzerinde etkili olduğundan HAp için ayırt edici temel özellikler olan mekanik eğilme mukavemeti, gerilme mukavemeti ve kırılma dayanıklılığı gibi değerler üzerinde de değişimlere sebep olacaktır (Turkoz, Atilla, and Evis 2013). Özellikle ortopedi uygulamalarında mekanik özelliklerde ki değişimler dikkatle incelendiğinden bu değişimlerin bu tarz uygulamalar için değerlendirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

4. Sonuçlar

Çöktürme yöntemiyle üretilen HAP'nin ve gümüş katkılı HAP'lerin faz tanımlaması ve faz safsızlıklarının belirlenmesi için XRD cihazı kullanılmıştır. Alınan tüm XRD sonuçlarının ICDD dosyaları ile tutarlı karakteristik zirvelere sahip olduğu görülmüştür. HAP ve farklı gümüş katkılı HAP örneklerinin XRD grafiklerinde CaO'nun eser elementleri gözlemlenmemesine rağmen çok az miktarda β -TCP fazına ait pikler gözlenmiştir. Burada gözlenen β -TCP fazı % 0,5'in altında gözlemlendiği için malzeme safsızlığında dikkate değer bir oran olarak değerlendirilmemiştir. Kalsiyum fosfat (CaP) bazlı en çok incelenen ve kullanılan ayrıca klinik olarak test edilmiş sentetik malzemeler HAP, β -trikalsiyum fosfat (β -TCP - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) ve iki fazlı HAP/ β -TCP karışımları olduğundan üretimi yapılan ürünlerde çok az β -TCP gözlemlenmesinin klinik uygulamalarda sorun teşkil etmeyeceği düşünülmektedir.

Çöktürme yönteminde ana girdi ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, NH_3 , AgNO_3 ' dür. Ana girdilerle başlatılan üretimin sonucunda %99,0 üzerinde katkısız $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ HAP'nin XRD piklerinin varlığı ve NH_4^+ , NO_3^- yabancı bileşenlerin XRD piklerinin gözlemlenmemesi, çöktürme metodu içerisinde gerçekleştirilen kurutma ve sinterleme işlemleri sonucunda $20\text{NH}_4\text{NO}_3$ ve $6\text{H}_2\text{O}$ bileşenlerinin yapıdan tamamen ayıldığını göstermektedir. Çöktürme yöntemiyle üretimi yapılan HAP ve %0,05 - %0,20 - % 040 Ag katkılanmış HAP örneklerinin sahip olduğu PO_4^{3-} , OH^- , CO_3^{2-} , HPO_4^{2-} bileşen gruplarının belirlenmesi için FTIR analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda HAP'in sahip olduğu PO_4^{3-} ana bileşeninin dalga boyu değerleriyle, üretilen HAP örneklerinin hem HAP fazı hem de XRD sonucuyla örtüşecek şekilde çok az miktarda β -TCP fazının varlığını göstermiştir. Bununla birlikte CO_2 ' nin suda çözünmesi ve sonuçta meydana gelen karbonat iyonlarının HAP kristal kafesi içine dâhil olmasıyla CO_3^{2-} bileşenleri, FTIR analizinde gözlemlenmiştir. HAP ve %0,05 - %0,20 - %0,40 oranlı Ag iyonları eklenmiş gümüşlü HAP tozları için yapılan FTIR çalışmalarında karakteristik HAP'le uyumlu bileşen grupları gözlemlenmiştir. Üretilen HAP örnekleri için yapılan FTIR analizlerinde sentez parametrelerinden kaynaklanan H_2O grubu pikleri gözükse de NO_3^- ve NH_4^+ gruplarına ait pikler gözlenmemiştir.

Çöktürme yöntemiyle üretimi yapılan HAP ve %0,05 - %0,20 - %0,40 Ag katkılanmış HAP örneklerinin SEM görüntülerinde tane boyutu < 500 nm seviyelerinde olan, az deformeli, düzgün dağılımlı, küresel ve düzenli şekilli parçacıklara sahip ve bal peteği desenli bir morfoloji gözlemlenmiştir. Aynı zamanda bu çalışma içeriğinde seçilen gümüş katkılama oranındaki değişimin HAP morfolojisi üzerinde bir etki göstermediği görülmüştür. Isıl işlemin başlangıcından bitişine kadar HAP yüzeyleri pürüzlüden pürüzsüze doğru ilerlediğinden yüzey pürüzsüzlüğünün üretim parametrelerine bağlı olduğu görülmüştür. Elde edilen bu pürüzsüz yüzey çöktürme yönteminde uygulanan parametrelerin uygunluğunu göstermiştir. Üretilen HAP'lerin sahip olabileceği fazlar XRD ve FTIR analizleriyle belirlenebilirken nihai üründen elde edilen Ca/P molar oranının bulunmasıyla da belirlenebileceği görülmüştür. SEM-EDS ve ICP-OES analizleri ile Ca/P oranı belirlenerek XRD, FTIR ve SEM sonuçları desteklenmeye çalışılmıştır. SEM-EDS ve ICP-OES analiz çalışmaları sonucunda kalsiyum fosfat seramikleri için tanımlanan Ca/P değeri HAP ve gümüşlü HAP'ler için 1,65–1,67 değerleri arasında elde edilmiştir. Bu sonuçlarda XRD, FTIR analizlerinden elde edildiği gibi katkısız HAP mineralini göstermektedir. Çöktürme yöntemiyle üretimi yapılan HAP ve %0,05 - %0,20 - %0,40 Ag katkılanmış HAP örneklerinin her birinin tane boyutları SEM ve Zeta Sizer analizleri ile belirlenmiştir. Her iki analiz sonucunda da bütün HAP'lerin < 500 nm boyutunda olduğu belirlenmiştir. Elde edilen tane boyut değerleri ile göre FDA tarafından biyolojik uygulamalarda kullanılacak CaP biyoseramik ürünleri için tanımlanan kriterleri sağladığı görülmüştür.

Çöktürme yöntemiyle sentezlenmiş HAP ve %0,05 - %0,20 - %0,40 oranlı Ag iyonları eklenmiş gümüşlü HAP faz safsızlıklarını belirlemek amacıyla yapılan XRD, sahip oldukları bileşen gruplarını belirlemek amacıyla kullanılan FTIR, yüzey morfolojisini belirlemek amacıyla yapılan SEM, Ca/P oranının belirlenmesi amacıyla yapılan EDS ve ICP-OES, yoğunluk ve tane boyut analizlerinden elde edilen sonuçlarla FDA tarafından biyolojik uygulamalarda kullanılacak CaP biyoseramik ürünlerini tanımlayan kriterlere uygun olduğu görülmüştür.

Referanslar

- Addy, M, and P Mostafa. 1988. "Dentine Hypersensitivity. I. Effects Produced by the Uptake in Vitro of Metal Ions, Fluoride and Formaldehyde onto Dentine." *Journal of Oral Rehabilitation* 15(6): 575–85.
- Arnold, W H, M Prange, and E A Naumova. 2015. "Effectiveness of Various Toothpastes on Dentine Tubule Occlusion." *Journal of dentistry* 43(4): 440–49.
- ASTM. 2013. "E2149.Standard Test Method for Determining the Antimicrobial Activity of Antimicrobial Agents Under Dynamic Contact Conditions." *ASTM Standard Book*.
- Brännström, Martin, and Arne Åström. 1964. "A Study on the Mechanism of Pain Elicited from the Dentin." *Journal of dental research* 43(4): 619–25.
- Byers, Margaret R, and Willie K Dong. 1983. "Autoradiographic Location of Sensory Nerve Endings in Dentin of Monkey Teeth." *The Anatomical Record* 205(4): 441–54.

- Chiang, Y-C et al. 2010. "A Novel Mesoporous Biomaterial for Treating Dentin Hypersensitivity." *Journal of dental research* 89(3): 236–40.
- Chu, C H, E C M Lo, and H C Lin. 2002. "Effectiveness of Silver Diamine Fluoride and Sodium Fluoride Varnish in Arresting Dentin Caries in Chinese Pre-School Children." *Journal of dental research* 81(11): 767–70.
- Cummins, D. 2011. "Advances in the Clinical Management of Dentin Hypersensitivity: A Review of Recent Evidence for the Efficacy of Dentifrices in Providing Instant and Lasting Relief." *Journal of Clinical Dentistry* 22(4): 100.
- Cunha-Cruz, J et al. 2011. "Dentin Hypersensitivity and Oxalates: A Systematic Review." *Journal of dental research* 90(3): 304–10.
- Destainville, A., E. Champion, D. Bernache-Assollant, and E. Laborde. 2003. "Synthesis, Characterization and Thermal Behavior of Apatitic Tricalcium Phosphate." *Materials Chemistry and Physics*.
- DIN Deutsches Institut für Normen e.V. 2007. Beuth Verlag *DIN EN 13779*.
- Dorozhkin, Sergey V. 2010. "Calcium Orthophosphates as Bioceramics: State of the Art." *Journal of Functional Biomaterials*.
- Earl, J S et al. 2011. "Physical and Chemical Characterization of Dentin Surface Following Treatment with NovaMin Technology." *The Journal of clinical dentistry* 22(3): 62–67.
- Giuca, M R, G Cei, F Gigli, and P Gandini. 2010. "Oral Signs in the Diagnosis of Celiac Disease: Review of the Literature." In *Minerva Stomatol.*,
- Giulietti, M. et al. 2001. "Industrial Crystallization and Precipitation from Solutions: State of the Technique." *Brazilian Journal of Chemical Engineering*.
- Gysi, Alfred. 1900. "An Attempt to Explain the Sensitiveness of Dentine." *Brit J Dental Sci* 43: 865–68.
- Hardie, J M. 1982. "The Microbiology of Dental Caries." *Dental update*.
- Hellmich, C. and Ulm, F. J. 2002. "Micromechanical Model for Ultrastructural Stiffness of Mineralized Tissues." *Journal of Engineering Mech* 128(8): 898–908.
- Hirvonen, T J, and M V O Narhi. 1986. "The Effect of Dentinal Stimulation on Pulp Nerve Function and Pulp Morphology in the Dog." *Journal of dental research* 65(11): 1290–93.
- Jones, Rod M. 2003. "Particle Size Analysis by Laser Diffraction: ISO 13320, Standard Operating Procedures, and Mie Theory." *American Laboratory*.
- Keskin A. 2000. "Hidroksiapatit Seramiklerinin Mekanik Özelliklerinin Zirkonya İlavesi İle Geliştirilmesi." İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Kweh, S W K, K A Khor, and P Cheang. 1999. "The Production and Characterization of Hydroxyapatite (HA) Powders." *Journal of Materials Processing Technology* 89: 373–77.
- Lavender, Stacey Ann et al. 2010. "Mode of Action Studies of a New Desensitizing Dentifrice Containing 8.0% Arginine, a High Cleaning Calcium Carbonate System and 1450 Ppm Fluoride." *American journal of dentistry* 23(Special Issue): 14A-19A.
- Lazić, S., J. Katanić-Popović, S. Zec, and N. Miljević. 1996. "Properties of Hydroxyapatite Crystallized from High Temperature Alkaline Solutions." *Journal of Crystal Growth*.
- Lazić, Slavica, Slavica Zec, Nada Miljević, and Slobodan Milonjić. 2001. "The Effect of Temperature on the Properties of Hydroxyapatite Precipitated from Calcium Hydroxide and Phosphoric Acid." *Thermochemica Acta*.
- Lee, S Y, H K Kwon, and B I Kim. 2008. "Effect of Dentinal Tubule Occlusion by Dentifrice Containing Nano-carbonate Apatite." *Journal of Oral Rehabilitation* 35(11): 847–53.
- Llodra, J C et al. 2005. "Efficacy of Silver Diamine Fluoride for Caries Reduction in Primary Teeth and First Permanent Molars of Schoolchildren: 36-Month Clinical Trial." *Journal of dental research* 84(8): 721–24.

- Pashley, David Henry, M J Livingston, O W Reeder, and J Horner. 1978. "Effects of the Degree of Tubule Occlusion on the Permeability of Human Dentine in Vitro." *Archives of oral biology* 23(12): 1127–33.
- Paujindanetr, S. 1993. "Characterisation and Sintering of Precipitated Hydroxyapatite." Queen Mary and Westfield College London.
- Seckler, M.M. et al. 2005. "Influence of Process Conditions on Hydroxyapatite Crystallinity Obtained by Direct Crystallization." *Materials Research*.
- Ślósarczyk, Anna, Zofia Paszkiewicz, and Czesława Paluszkiwicz. 2005. "FTIR and XRD Evaluation of Carbonated Hydroxyapatite Powders Synthesized by Wet Methods." In *Journal of Molecular Structure*,.
- Smičiklas, Ivana, Antonije Onjia, and Slavica Raičević. 2005. "Experimental Design Approach in the Synthesis of Hydroxyapatite by Neutralization Method." *Separation and Purification Technology*.
- Tan, H P et al. 2010. "A Randomized Trial on Root Caries Prevention in Elders." *Journal of dental research* 89(10): 1086–90.
- Touger-Decker, R, and Loveren C Van. 2003. "Sugars and Dental Caries. [Review] [101 Refs]." *American Journal of Clinical Nutrition*.
- Turkoz, Mustafa, Aykan Onur Atilla, and Zafer Evis. 2013. "Silver and Fluoride Doped Hydroxyapatites: Investigation by Microstructure, Mechanical and Antibacterial Properties." *Ceramics International* 39(8): 8925–31.
- Vallet-Regí, María. 2006. "Revisiting Ceramics for Medical Applications." *Dalton Transactions* (44): 5211–20.
- Verron, E., J. M. Boulter, and J. Guicheux. 2012. "Controlling the Biological Function of Calcium Phosphate Bone Substitutes with Drugs." *Acta Biomaterialia*.
- Wang, Ronghan et al. 2014. "Enhancement of Nano-Hydroxyapatite Bonding to Dentin through a Collagen/Calcium Dual-Affinitive Peptide for Dentinal Tubule Occlusion." *Journal of biomaterials applications* 29(2): 268–77.
- Zhang, W, C McGrath, E C M Lo, and J Y Li. 2013. "Silver Diamine Fluoride and Education to Prevent and Arrest Root Caries among Community-Dwelling Elders." *Caries research* 47(4): 284–90.



Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen AA2024 ve AA6061 Matrisli, B₄C ve SiC Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mikroyapı, Mekanik ve Isıl İletkenlik Özelliklerine Basıncın Etkisi

Effect Of Pressure On The Microstructure, Mechanical and Thermal Conductivity Properties Of Composite Materials with Matrix of AA2024 or AA6061 and Reinforced B₄C or SiC Produced by Pressurized Infiltration Method

Kadir Gündoğan¹ , Alperen R.B. Özsarı¹ 

¹ Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği, Uşak, TÜRKİYE.

Başvuru/Received: 26/02/2019

Kabul/Accepted: 18/06/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Bu çalışmada, AA2024 veya AA6061 matrisli, B₄C veya SiC partikül takviyeli olarak üretilen kompozit malzemelerin mikroyapı, mekanik ve ısıl iletkenlik özelliklerine, matris bileşimi ile basınç değerinin etkisi incelenmiştir. 48 µm ortalama tane boyutuna sahip B₄C tozları veya 37 µm ortalama tane boyutuna sahip SiC tozları kullanılarak çelik borular içerisine 50x8 mm ölçülerinde preformlar oluşturulmuştur. Basınçlı infiltrasyon tekniği kullanılarak 800 °C'de 7 veya 8 bar basınçlarda alüminyum matrisler preformlara infiltre edilmiştir. Elde edilen kompozitlerin mikroyapı analizleri EDS donanımlı taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Üretilen numunelerin SEM görüntülerinde homojen bir mikro yapı dağılımı gözlemlenmiştir. Numunelerin porozite analizi alkol içerisinde daldırılmalı askı aparatlı hassas terazi cihazı kullanılarak yapılmıştır. Basınç miktarı arttıkça, porozite hacim oranlarında büyük ölçüde azama meydana gelmiştir. Matris elemanlarına ayrı ayrı olarak infiltre edilen takviye elemanlarının matris elemanında oluşturdukları yapısal farklılıklar, X-Işını difraksiyonu (XRD) ile incelenmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin basınç miktarının artması ile sertlik dayanımlarında ve basma mukavemetlerinde artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Mekanik özellikler açısından kıyaslamada takviye elemanları açısından kıyaslama yapıldığında SiC takviyeli kompozit malzemelere göre B₄C takviyeli kompozit malzemelerin daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“AA6061, AA2024, Kompozit Malzeme, Basınçlı İnfiltrasyon, Mikroyapı, Mekanik Özellikler, SiC, B₄C”

Abstract

In this study, the effect of matrix composition and pressure value on the microstructure and mechanical properties of composite materials produced by AA2024 and AA6061 matrix and 50% B₄C and SiC particle supplementation were investigated. Preforms were formed by using SiC powders with B₄C powders having an average grain size of 48 µm and a particle size of 37 µm. The prepared preforms were infiltrated with aluminum matrices at 7 and 8 pressures using the pressure infiltration technique at 800 °C. The microstructure analysis of the composite materials was carried out using EDS-equipped scanning electron microscope (SEM). A homogeneous microstructure was observed at the SEM analysis of the obtained samples. The porosity analysis was done by using the apparatus with the suspension apparatus in the integrated alcohol. A decrease in the porosity volume ratio was obtained with increasing pressure. It has been observed that the increase in the pressure amount of the composite materials produced increases the hardness strengths and compressive strengths. In addition, it is observed that B₄C reinforced composite materials have better mechanical properties than SiC reinforced composite materials when the reinforcement elements are compared.

Key Words

“AA6061, AA2024, Composite Material, Pressure Infiltration, Microstructure, Mechanical Properties, SiC, B₄C”

1. Giriş

Kompozit malzeme tanım olarak iki veya daha fazla sayıda, aynı yapıdaki veya farklı yapıdaki malzemelerin üstün oldukları özelliklerini tek bir malzemede birleştirmek için makro veyahut mikro düzeyde bir araya getirilmesiyle oluşturulan yeni malzemeler olarak tanımlanırlar. Otomobil lastikleri, sermetler ve karbon elyafı plastikler gibi kompozit malzeme şekliyle üretilen malzemeler bunlara örnek olarak gösterilebilir. Kompozit malzemeyi üç boyutlu şekilde meydana getirmede amaç, bileşenlerin hiçbirinde tek başına sağlanamadığı özelliklerin elde edilmesidir. Başka bir ifadeyle, istenilen özellikler doğrultusunda bileşenlerinden daha üstün özelliklere sahip bir malzeme elde edilmesi amaçlanmaktadır. Kompozit malzemelerin diğer malzeme çeşitlerine göre ön plana çıktıkları en iyi özellikleri hafif ve sağlamlık olarak ifade edebiliriz. Kompozit malzemeler son dönemlerde yaygın bir şekilde; otomotiv, deniz taşıtları, havacılık, makine, inşaat, askeri ve uzay teknolojisi alanlarında uygulanmaya başlanmıştır (Ateş vd., 2012).

Kompozit malzemeler, taşıyıcı görev üstlenen takviyeyle, takviyeyi bir arada tutup dış etkilerden koruyan matris olmak üzere iki fazdan meydana gelir. Metal matrisli kompozitler, istenilen özellikleri tek başlarına karşılayamayan metal malzemelerin, genel olarak seramik malzeme kaynaklı takviye elemanları kullanılarak meydana getirilen kompozit malzeme grubu olarak sınıflandırılır. Metal matrisli kompozitlerde talep edilen özelliklerin takviye elemanlarıyla malzemeye kazandırılması neticesinde, bu malzemeleri termal uygulamalarda ve devre elemanları olarak tercih edilen malzemeler haline getirmiştir. Genellikle bu kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanları, metal matrise göre daha düşük ısı genleşme katsayısına ve ısı iletkenlik değerine sahip partiküllerdir. Farklı üretim yöntemleriyle kullanım alanına uygun olarak istenilen özelliklerin malzemeye kazandırılabilmesi özelliğinden dolayı metal matrisli kompozitler ısı yönetim için tercih edilen en uygun malzemedir (Çevik vd., 2015; Çevik vd., 2016; Sevim vd., 2014).

Metal matrisli kompozitlerde genellikle matris malzemesi olarak alüminyum ve alüminyum alaşımları kullanılır. Buna karşın alüminyuma nazaran magnezyum, demir, titanyum ve süper alaşımlar gibi matris malzemeleri daha az kullanılmaktadır (Sevim vd., 2014). Kompozit üretiminde genellikle karbür, nitrür, oksit ve borür gibi refrakter bileşiklerden oluşan endüstriyel tozlar kullanılmaktadır. Ancak, daha çok tercih edilen süreksiz takviye elemanları partikül ve kılcal kristal formda SiC, Al₂O₃ ve B₄C'dir. SiC'ün sertliği, kırılmaya karşı direnci, elastisite modülü Al₂O₃'den daha yüksek, yoğunluğu ve ısı genleşme katsayısı daha düşük olduğundan genelde SiC'ün takviye elemanı olarak kullanımı daha yaygındır. B₄C ise yüksek sertlik, iyi iyileştirilebilirlik, korozyon dayanımı yüksek, iyi kaynak yapılabilir gibi özelliklerinden dolayı en çok tercih edilen takviye elemanlarından biridir (Ahlacı vd., 2016).

Metal matrisli kompozit üretiminde döküm, toz metalurjisi, insitu ve infiltrasyon gibi farklı yöntemler tercih edilmektedir (Ahlacı vd., 2016; Stefanescu vd., 1992; Gedeon vd., 1991). Günümüzde metal matrisli kompozit malzeme üretiminde sıvı yöntemler, partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerde oldukça tercih edilen üretim yöntemlerindedir (Şahin, 2003). İnfiltrasyon yönteminde kendi içerisinde birkaç çeşitli uygulama tekniği vardır. Bu teknikler; basınçlı infiltrasyon, basınçsız infiltrasyon ve vakum infiltrasyon olmak üzere 3 başlıkta sıralanabilmektedir (Buhrmaster vd., 1988; Aguliar-Martinez vd., 2003). Basınçlı infiltrasyon yöntemi; ön şekil verilmiş gözenekli takviye elemanlarına sıvı metal matrisin nüfuz edebilmesi için, sıvı metal matrise mekanik basınç uygulamak yerine inert gaz basıncı uygulayan bir sıvı infiltrasyon tekniğidir (Hamzawy vd., 2005). Genel olarak son şekle yakın üretim imkânı sağlaması, hızlı ve yüksek üretim kapasitesine sahip olması gibi sağladığı avantajlarından ötürü basınçlı infiltrasyon yöntemi en sık tercih edilen önemli üretim tekniklerindedir. Bu yöntemde matris malzemesi olarak daha çok alüminyum ve magnezyum alaşımları geniş kullanım alanına sahip olmuşlardır. Bunların arasında üstün Alüminyum ve alaşımları sağladıkları mekanik özelliklerle, düşük elektrik iletkenliğine, yüksek korozyon direncine, düşük yoğunluğa ve diğer hafif metallere göre düşük maliyete sahip olmaları gibi özelliklerden ötürü matris alaşımı olarak kullanımı diğer alaşımlara nazaran daha çok ön plana çıkarak çalışmalarda yer bulmaktadır (Çevik vd., 2015).

Hafif metaller arasında düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci ve düşük üretim maliyeti gibi avantajları ile öne çıkan alüminyum ve alaşımları metal matrisli kompozitlerde matris elemanı olarak tercih edilmede ilk sıralarda yer almaktadır. Bu sebeplerden dolayı metal matrisli kompozit üretiminde alüminyum ve alaşımları, otomotiv, havacılık ve bilişim sektörlerinde ticari olarak kullanılmasının yanı sıra bilim adamları tarafından da farklı uygulama alanları için çalışmalarda kullanılmaktadır (Çevik vd., 2016; Sevim vd., 2014). Basınçlı infiltrasyon tekniğinde; sıvı metal sıcaklığı, takviye tane büyüklüğü, infiltrasyon süresi ve basıncı en önemli infiltrasyon parametrelerini teşkil ederler ve sıvı metal sıcaklığı bu parametrelerin en önemlilerinden birisidir. Elektronikte kullanılan paketleme malzemeleri; yüksek termal iletkenliğe, ideal yoğunluğa, düşük termal genleşme katsayısına, uygun maliyete sahip olması gerekmektedir. Fakat geleneksel paketleme malzemeleri bütün bu özellikleri karşılamadığından seramik takviyeli metal matrisli kompozitler geliştirilmiştir (Benal vd., 2007). Bundan dolayı kompozit malzemelerin ısı iletkenlik katsayılarının önemi son zamanlarda daha da fazla bir şekilde önem kazanmıştır. Elektronik sektöründeki yeni uygulama çalışmalarında; elektronik cihaz boyutlarının olabildiğince küçük hale getirilmesi ve ortaya koyabilecekleri güçlerinin artması sayesinde bu cihazlarda kullanılacak olan malzemeler için ısı iletim katsayısı 250-300(W/mK) gibi oldukça yüksek, yaklaşık malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır (Zweben, 1998; Liu vd., 1997). Metal matrisli kompozit malzemelerin mikroyapısı ısı iletkenliklerinde çok önemli bir rol oynar (Ateş ve Kızılok, 2011).

Narciso J., ve arkadaşları (1995) yaptıkları çalışmada, matris malzemesi olarak alüminyum, takviye elemanı olarak SiC kullanarak basınçlı infiltrasyon yönteminde sıcaklığın infiltrasyona etkisini incelemiştirler. 750°C ile 1000°C sıcaklık aralığında yapılan deneylerde takviye-hacim oranı yaklaşık olarak %57'dir. Sonuç olarak SiC kompaktların infiltrasyonunda sıcaklık artması ile eşik basıncın azaldığını belirlemiştirler (Narciso vd., 1995).

Ahlatçı H., ve arkadaşları (2002) yapmış oldukları çalışmada, saf Al (%99.8) matrisli ve %60 oranında SiC partikül takviyeli kompozit malzemelerin tane boyutunun darbe davranışı üzerine etkisini araştırmışlar, elde ettikleri verilere göre SiC partiküllünün tane boyutu arttıkça kompozit malzemenin darbe dayanımının düştüğünü belirtmişlerdir. Partikül tane boyutunun artışı ile partiküllerdeki kırılma hasarının artması sonucuna varmışlardır (Ahlatçı vd., 2002).

Chong Y., ve arkadaşları (1993) yaptıkları çalışmada, SiC takviyeli alüminyum alaşımı matrisli kompoziti basınçlı infiltrasyon tekniğini kullanarak üretmişlerdir. İnfiltrasyon için gerekli eşik basıncın artan SiC parçacık büyüklüğü ve artan infiltrasyon sıcaklığı ile azaldığını tespit etmişlerdir. Çalışmada ayrıca artan infiltrasyon sıcaklığı ile gözenek miktarının azaldığını tespit etmişlerdir (Chong vd. 1993).

Mazaheri Y., ve arkadaşları (2013) yapmış oldukları çalışmada, Al-% 10 TiC, Al-% 10 B₄C, Al-% 5 TiC-% 5 B₄C döküm teknikleri ile üretilen kompozitleri ele almışlardır. Ancak, döküm tekniği ile üretilen kompozit malzemelerde takviye elemanlarının matris içerisine homojen olarak dağılamama sorunu ile karşılaşmaktadır. Bu sorunlar nedeniyle kompozit malzemeler üretilirken takviye elemanlarının bir noktaya yığılmaması için dikkatli olunmuştur. Kompozit malzemelerin mikroyapı karakterizasyonu, EDS ve XRD ile SEM kullanılarak incelenmiştir. Numunelerin mekanik karakterizasyonu incelendiğinde maksimum sertlik Al-% 5 TiC-% 5 B₄C kompozit malzemesinde, maksimum uzama özelliği Al-% 10 TiC kompozit malzemesinde, maksimum verim ve çekme dayanımı ise Al-% 10 B₄C kompozit malzemesine ait olduğunu gözlemlenmiştir. Ayrıca, kompozitlerin özellikleri açısından en iyi davranışı Al-B₄C kompozit malzemesi sergilemiştir (Mazaheri vd., 2013).

Şahin, Y., (2003) yaptığı çalışmasında; inert gaz altında sıkıştırılmalı döküm metodu ile ağırlıkça %10 ve %20 ile farklı tane büyüklüklerinde SiC'le takviyelendirilmiş alüminyum alaşımli kompozit malzemeleri üretmiştir. Mikroskopik inceleme, sertlik, yoğunluk ve porozite ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kompozit malzeme, farklı hızlarda ve derinliklerde farklı kesme takımları kullanarak kesme işlemine tabi tutulmuştur. Mikroyapı incelemesinde homojen bir dağılım gözlemlenmiştir. Yoğunluğun azalan partikül ebadı ile düştüğü, buna karşın porozite miktarının artan partikül ebadı ile azaldığı belirtilmiştir. Bunlara ek olarak, bütün testlerde takım ömrünün, artan kesme hızı ile önemli derecede azaldığı tespit edilmiştir. Kesme takımları arasında SiC takviyeli kompozit malzemenin işleminde, Al₂O₃ kaplı takımın aşınma direnci performansının kırıcı çentiği olmayan diğer takımlarinkinden daha iyi olduğu belirtilmiştir. (Şahin, 2003).

Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde bir çok çalışmada kullanılan AA2024 ve AA6061 alüminyum alaşımlarına farklı kompozit malzeme üretim yöntemleriyle takviye edilen B₄C ve SiC takviye elemanlarının mikroyapı ve mekanik özellikleri incelendiği görülmüştür. İncelemeler sonucunda ise B₄C ve SiC takviyeli AA2024 ve AA6061 matrisli kompozit malzemelerin sabit sıcaklıkta değişken basınçlar altında üretilmediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, yapılan çalışmalarda genel olarak sadece tek takviye elemanı ile üretilen kompozit malzemenin mekanik özellikleri incelenmiş ve literatür araştırması ile farklı takviye elemanlarının etkileri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada aynı üretim yöntemi ve üretim şartları içerisinde farklı takviye elemanlarının kompozit malzemenin mekanik ve ıyapı özelliklerine etkisi net olarak incelenmiştir. Literatürdeki bu açığın giderilmesi için bu çalışmanın yapılmasına karar verilmiştir. AA2024 veya AA6061 matrisli, B₄C veya SiC partikül takviyeli olarak üretilen kompozit malzemelerin mikroyapı, mekanik ve ısı iletkenlik özelliklerine, matris bileşimi ile basınç değerinin etkisi incelenmiştir. Elde edilen kompozitlerin mikroyapı analizleri EDS donanımlı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmesi yapılmıştır. Ayrıca matris elemanlarına ayrı ayrı olarak infiltre edilen takviye elemanlarının matris elemanında oluşturdukları yapısal farklılıklar, X-Işını difraksiyonu (XRD) ile incelenmiştir. Sertlik ve basma deneyleriyle mekanik özellikler belirlenerek, üretilen kompozit malzemelerin termal iletkenlik katsayısı analizi yapılmıştır.

2. Deneysel Yöntem

Bu çalışmada, ticari olarak temin edilen AA2024 veya AA6061 alüminyum alaşımları matris elemanı olarak kullanılmıştır. 8 mm çapındaki paslanmaz tüp içerisine hazırlanan üretilmek istenen preformun hacim olarak %50 oranında B₄C veya SiC takviye elemanları eklenmiş, bu çelik tüplerin içerisine pota içerisnde erğitilen matris alaşımları 7 bar veya 8 bar basınç değerleri ile infiltrasyon prosesi kullanılarak infiltre edilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin öncelikle mikroyapı karakterizasyonu yani SEM, EDS ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Mekanik özellikleri ise sertlik ve basma deneyleri ve termal iletim katsayısı analiziyle incelenmiştir. Tablo 1 ve Tablo 2'de matris elemanı olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri verilmiştir. Takviye elemanı olarak ortalama 48 µm tane boyutuna sahip B₄C partikülleri ile, ortalama 37 µm tane boyutuna sahip SiC partikülleri kullanılmıştır.

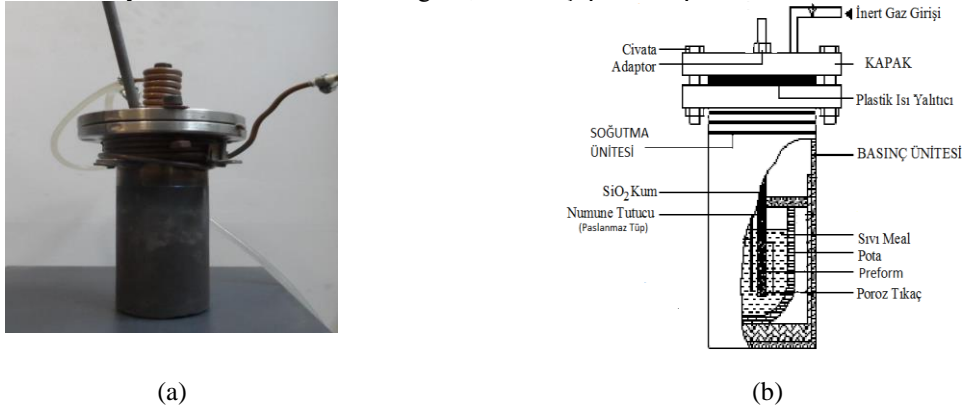
Tablo 1. Kullanılan matris elemanlarının kimyasal bileşimleri

Alaşım	Fe	Si	Cr	Mn	Mg	Zn	Cu	Ti	Zi+Ti	Diğer	Al
AA2024	0.5	0.5	0.1	0.3-0.9	1.2-1.8	0.25	3.8-4.9	-	0.15	0.15	Kalan
AA6061	0.5	0.6-1.0	0.1	0.2-0.8	0.8-1.2	0.25	0.6-1.1	0.1	-	0.15	Kalan

Tablo 2. Kullanılan matris elemanlarının mekanik özellikleri

Alaşım	Akma Mukavemeti (MPa) min-max	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	Uzama (%50) min-max	Sertlik (Brinel) min-max
AA2024	75	185	20	55
AA6061	103-228	55-124	26	30

Kompozit malzemelerin üretiminin gerçekleştirildiği basınçlı infiltrasyon ünitesine ait fotoğraf ve şematik görüntüler Şekil 1’de yer almaktadır. İnfiltrasyon ünitesi 230 mm uzunluğuna, 70 mm çapına sahiptir.



Şekil 1. Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan infiltrasyon ünitesine ait (a) fotoğraf ve (b) şematik görüntümler

Düzenek her şeyi ile tam olarak hazır hale getirilerek infiltrasyon sıcaklığı olarak belirlediğimiz 800°C sıcaklığa 1 h’te çıkartılmış ve tam olarak ergimenin sağlanması amacıyla 1 h daha beklenilmiştir. Hazırlanan preform, ergiyik içerisine daldırılarak sıvı metalin sıcaklığına ulaşması için 2 min. infiltrasyon ünitesi içerisinde tutulmuştur. Sonra 3 min. boyunca 7 bar veya 8 bar infiltrasyon basınçları uygulanmış ardından argon gazı ünitiden serbest bırakılmıştır. Üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemeler infiltrasyon ünitesinden çıkarıldıktan sonra doğal soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan kompozit malzemeler torna ile paslanmaz tüpler yüzeyden temizlenmiş ve kompozit malzemeler elde edilmiştir.

Şekil 2’de şematik görüntüsü yer alan 10 mm dış çapında, 8 mm iç çapında ve 350 mm uzunluğunda paslanmaz tüpler preform tutucu olarak kullanılmıştır. Paslanmaz tüpün ucu %85 poroziteye sahip alümina filtre ile kapatılmıştır. Paslanmaz tüp içerisinde takviye hacim oranı %50 olacak şekilde Ø8x50 mm uzunluğunda preformlar elle vibrasyona tabii tutulmak hazırlanmıştır. İnfiltrasyon sırasında partiküllerin homojen dağılımının bozulmaması amacıyla hazırlanan preformun üstü alümina filtreyle kapatılmış ve tüpün kalan kısmı silika döküm kum ile doldurulmuştur.



Şekil 2. (a) Numune tutucu paslanmaz çelik tüpün şematik görünümü ve (b) Üretilen metal matrisli kompozit malzeme

Mikroyapı incelemeleri için numuneler öncelikle uygun boyutlara gelebilmesi için hassas kesme cihazında elmas diskle kesilmiştir. Struers marka cihazla sıcak bakalıte alınmıştır ve daha sonra standart metalografik prosedür uygulanarak Struers marka otomatik zımparalama-parlatma cihazında numuneler metalografik inceleme için hazır hale getirilmiştir. Mikroyapısal incelemeler enerji dağılımı spektrometresi (EDS) donanımlı Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin porozite analizi alkol içerisinde daldırılmalı askı aparatlı hassas terazi cihazı kullanılarak yapılmıştır.

Rigaku Ultima IV marka X ışınları difraksiyonu cihazı kullanılarak, 40 kv jeneratör gerilimi, 30 mA akımda 20° - 90° açı aralığında ve 0.02 adım tarama boyutlu 2 derece/dk. hızda XRD desenleri elde edilmiştir. Metalografik prosedürler uygulanarak hazırlanan numunelere, makrosertlik cihazında Brinell batıcı uç ile sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Sertlik deneyi 62.5 kg yük altında 15 saniye süreyle, her bir numuneden 7 adet ölçüm alınmış ve bu ölçümlerin ortalama değerleri hesaplanarak sertlik değerleri

belirlenmiştir. Zwick/Roell Z600 marka test cihazı ile cihazının çene hızı 30 mm/h olarak seçilerek basma deneyi 8 mm çapında ve 14 mm yüksekliğinde numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin ısı iletkenlik değerleri, Anter Flash Line 2000 marka cihazla zamana bağlı ısı iletkenlik ölçüm temelinde dayalı (Laser Flash) tekniği kullanılarak ısı yayılım katsayısından eşitlik (1) ile dolaylı olarak hesaplanmıştır.

$$\alpha = \frac{k}{p * c} \quad (1)$$

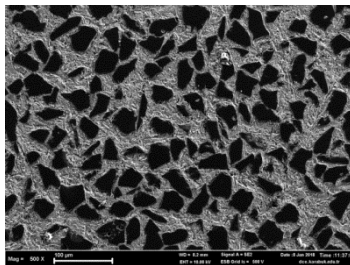
Bu cihazdaki ölçümler yapılırken numune boyutları cihaza uyarlanmak için Cast 95 ile çapı büyütülerek ölçümler yapılmıştır. Kompozit malzemelerin ısı iletkenlik değerini ölçmek için kullanılan flash tekniği geniş bir kullanım alanına sahiptir ve farklı sıcaklıklarda ısı iletkenliğinin ölçülmesine imkân sağlar (Liu vd., 1997). Uygulanan flash tekniğinde, cihaza yerleştirilen numunenin ön yüzü çok kısa süreli ve yoğun bir ısı enerjisi maruz bırakılmıştır. Isıl iletkenlik ölçümleri 25°C sıcaklıktan başlanılarak 200°C'ye kadar sekiz farklı sıcaklık değerinde, her bir ölçüm cihaz tarafından en az üç kez yapılarak bu ölçümlerin ortalaması alınarak ısı iletkenlik katsayısı belirlenmiştir.

3. Araştırma ve Bulgular

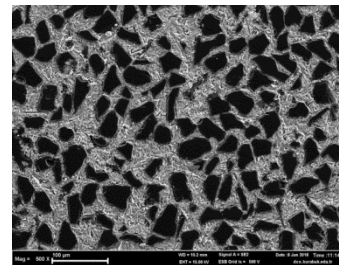
Ortalama 48 µm tane boyutu ile %50 hacim oranına sahip B₄C partikül takviyeli ve ortalama 37 µm tane boyutu ile %50 hacim oranına sahip SiC partikül takviyeli, sırayla 7 bar ve 8 bar basınç altında infiltrasyon işlemi gerçekleştirilerek üretilen AA2024 ve AA6061 matrisli kompozit malzemelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri aşağıda verilmiştir. Mikroyapısal incelemelerden, genel olarak partikül dağılımının uniform olduğu, matris içerisinde topaklanma sorunu gözlemlenmediği anlaşılmaktadır. Ancak porozitelerin genellikle partiküller etrafında yoğunlaştığı görülmektedir. Basınç miktarı arttırıldıkça porozite miktarının da azaldığı görülmektedir. Tablo 3'de AA2024 ve AA6061 matrisleriyle üretilen kompozit malzemelere ait takviye, matris ve porozite hacim oranları verilmiştir. Porozite miktarının 8 bar basınç altında üretilen kompozit malzemelerde, 7 bar basınç altında üretilen kompozit malzemelere göre daha çok azaldığı gözlenmiştir.

Tablo 3. Farklı basınç oranlarında infiltrasyonla elde edilen AA2024 matrisli kompozit malzemelerin takviye, porozite ve matris hacim oranları

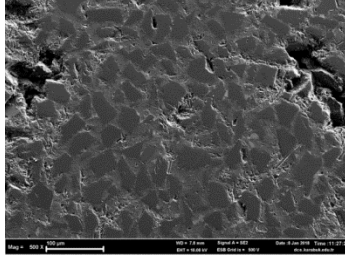
<i>Matris</i>	<i>Takviye Elemanı</i>	<i>Basınç Miktarı</i>	<i>Porozite (%)</i>
AA2024	B ₄ C	7	1.69
AA2024	B ₄ C	8	0.01
AA2024	SiC	7	2.27
AA2024	SiC	8	1.00
AA6061	B ₄ C	7	1.29
AA6061	B ₄ C	8	0.01
AA6061	SiC	7	2.26
AA6061	SiC	8	0.63



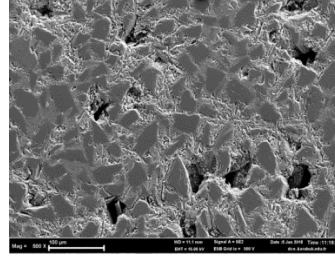
(a)



(b)

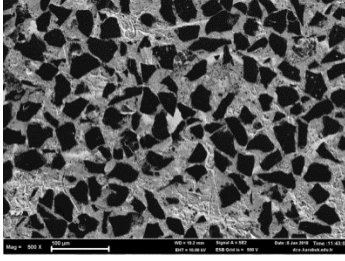


(c)

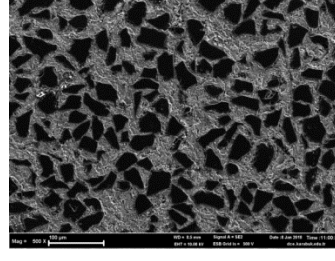


(d)

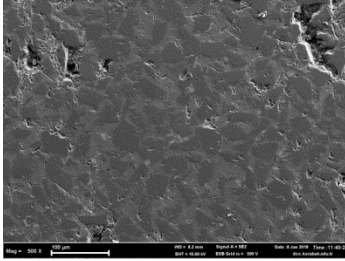
Şekil 3. Farklı basınç oranlarında infiltrasyon yapılan kompozit malzemelerin 500X büyütmede SEM görüntü analizleri (a) AA2024-B₄C-7 bar basınç, (b) AA2024-B₄C-8 bar basınç, (c) AA2024-SiC-7 bar basınç ve (d) AA2024-SiC-8 bar basınç



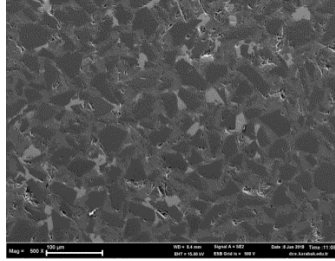
(a)



(b)

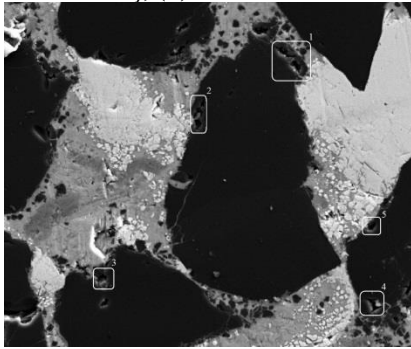


(c)

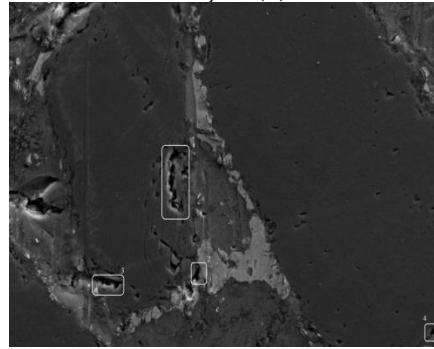


(d)

Şekil 4. Farklı basınç oranlarında infiltrasyon yapılan kompozit malzemelerin 500X büyütmede SEM görüntü analizleri (a) AA6061-B₄C-7 bar basınç, (b) AA6061-B₄C-8 bar basınç, (c) AA6061-SiC-7 bar basınç ve (d) AA6061-SiC-8 bar basınç



(a)

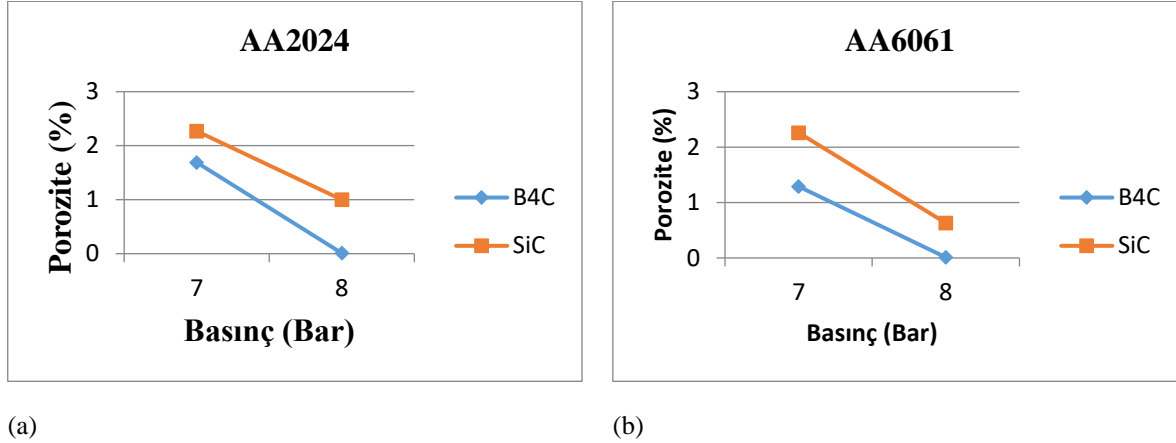


(b)

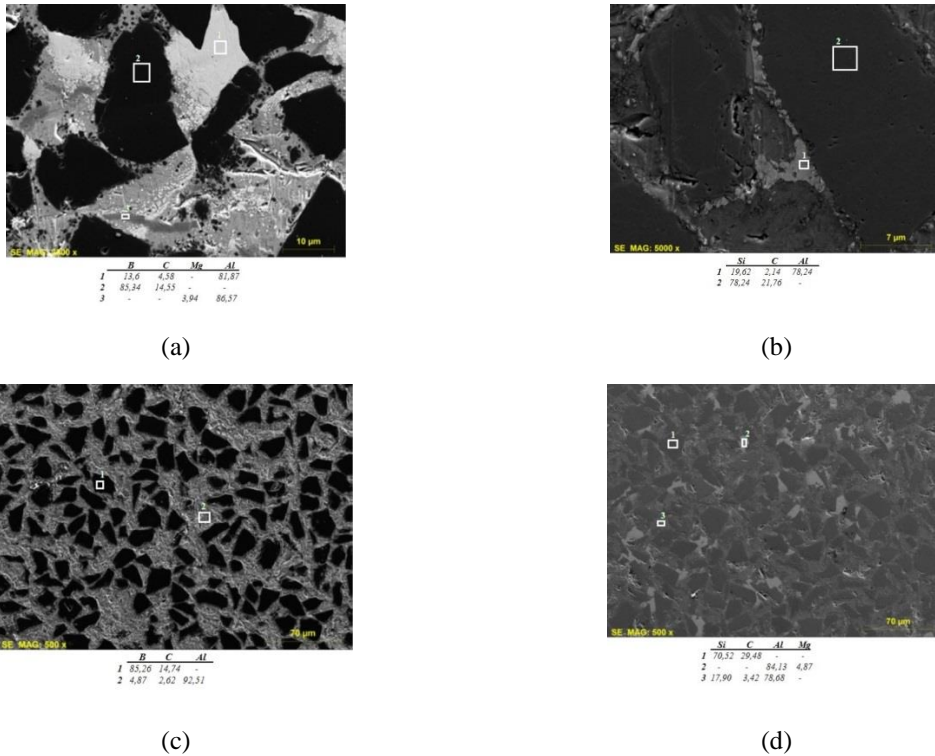
Şekil 5. Farklı basınç oranlarında infiltrasyon yapılan kompozit malzemelerin 5000X büyütmede SEM görüntü analizleri ve porozitelerin gösterilmesi (a) B₄C takviyeli kompozit malzeme, (b) SiC takviyeli kompozit malzeme

Basınçlı infiltrasyon yöntemiyle üretilmiş olan B₄C ve SiC partikül takviyeli AA2024 ve AA6061 matrisli kompozit malzemelerin mikroyapı görüntülerinde de (Şekil 3 ve 4) görüldüğü üzere B₄C ve SiC partikülleri homojen dağılmıştır. Şekil 5'de de görüldüğü üzere porozitenin B₄C ve SiC partiküllerinin etrafında yoğunlaştığı açıkça görülmektedir. Fakat SiC partiküllü kompozit malzemelerin B₄C partiküllü kompozitlere göre daha çok poroziteye sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun, takviye elemanlarının toz tane boyutlarındaki farklılıktan kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Üretimin çok hızlı gerçekleşmesi ve yüksek takviyeli kompozit malzemelerin üretimine imkan sağlaması nedeniyle kompozit malzeme üretiminde tercih edilen basınçlı infiltrasyon yönteminin kullanılmasıyla, yüksek partikül takviyeli kompozit malzemelerin en büyük üretim sorunlarından biri olan topaklanma problemi ile karşılaşılmamıştır. Matris bileşiminin Mikroyapıda bulunan porozite miktarına etkisini göstermek amacı

ile, AA2024 ve AA6061 matrislerin basınca bağlı olarak porozite miktarındaki değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Porozitedeki bu düşüşün, basıncın artırılması ile çelik tüp içerisindeki takviye elemanının tüp içerisinden daha üniform olarak dağılmasını sağlaması ve matris elemanın akıcılığını artırması nedeniyle en küçük boşluklara dahi sıvı metalin nüfuz etmesini kolaylaştırmış olmasından dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir.



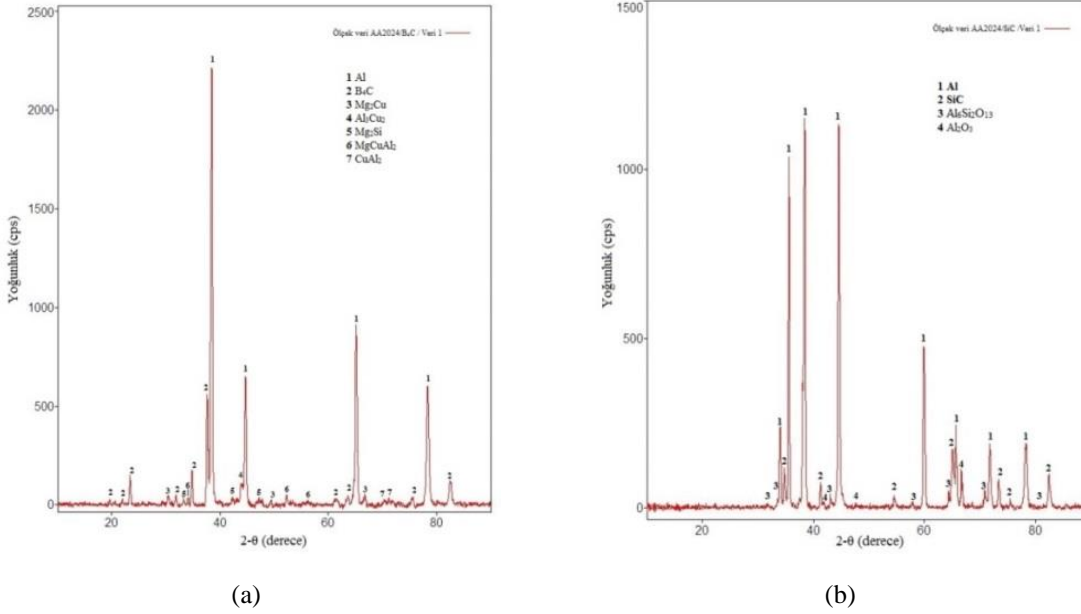
Şekil 6. Basınca bağlı porozite değişimi (a) AA2024 matrisli kompozit malzeme, (b) AA6061 matrisli kompozit malzeme



Şekil 7. Farklı basınç değerlerinde basılan kompozit malzemelerin SEM görüntüleri ve belirli bölgelerden alınan EDS analizleri (a) AA2024-B₄C-EDS analizi, (b) AA2024-SiC-EDS analizi (c) AA6061-B₄C-EDS analizi ve (d) AA6061-SiC-EDS analizi

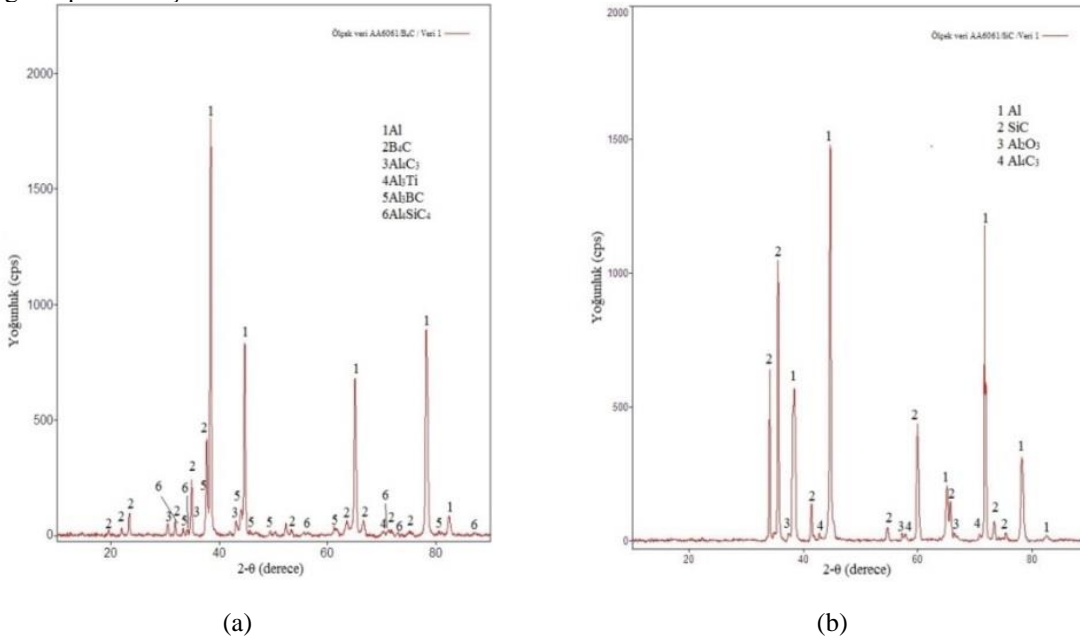
Şekil 7'de B₄C ve SiC takviyeli AA2024 ve AA6061 matrisli kompozitlere ait SEM fotoğrafları ve belirli bölgelerden alınan EDS analizleri görülmektedir. Şekil 7.a'da verilen B₄C takviyesi ile üretilen kompozit malzemenin SEM fotoğraflarından, takviye matris arayüzeyinde gri renkli keskin uçlara sahip intermetaliklerin olduğu gözlemlenmiştir. Bu intermetalikler üzerinden alınan EDS sonuçlarına göre (1) nolu bölgede %81.87 Al, %13.6 B ve %4.58 C içeriği tespit edilmiştir. (2) nolu bölgenin ise %85.34 B ve %14.55 C içerdiği görülmüştür. (3) nolu bölgede ise %86.57 Al ve %3.94 Mg içeriği sonucuna varılmıştır. Şekil 7.b'de ise verilen SiC takviyesi ile üretilen kompozit malzemenin SEM fotoğraflarından, takviye matris arayüzeyinde intermetaliklerin olduğu gözlemlenmiştir. Bu intermetalikler üzerinden alınan EDS sonuçlarına göre (1) nolu bölgede %78.24 Al, %19.62 Si ve %2.14 C içeriği tespit edilmiştir. (2) nolu bölgenin ise %70.80 Si ve %30.20 C içerdiği görülmüştür. Şekil 7.c'de verilen B₄C takviyesi ile üretilen AA6061 matrisli kompozit malzemenin SEM fotoğraflarından, takviye matris arayüzeyinde keskin uçları olan gri renkli intermetaliklerin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu intermetalikler üzerinde yapılan EDS analizlerine göre (1)'nolu bölgede %85.26 B ve %14.74 C içeriği tespit edilmiştir. (2)'nolu bölgenin ise %92.51 Al, %4.87 B ve %2.62 C içerdiği görülmüştür. Şekil 7.d'de ise SiC takviyeli, AA6061 matrisli kompozit malzemenin SEM görüntülerinden, matris takviye arayüzeyinde intermetaliklerin olduğu gözlemlenmiştir. Oluşan intermetaliklerin üzerinde yapılan EDS analiz sonuçlarına göre (1)'nolu bölgede %70.52 Si ve %29.48 C içeriği tespit edilmiştir. (2)'nolu bölgenin ise %84.13 Al ve %4.87 Mg içerdiği görülmüştür. (3)'nolu bölgede ise %78.68 Al, %17.90 Si ve %3.42 C içeriği sonucuna varılmıştır.

Şekil 8'da AA2024 alüminyum alaşımına B₄C ve SiC takviyesi ile üretilmiş kompozit malzemelere ait XRD desenleri yer almaktadır. Şekil 8.a'da XRD desenleri analizlerinden görüldüğü üzere B₄C takviyesi ile üretilen AA2024 matrisli kompozit malzemelerde Mg₂Cu, Al₃Cu₂, MgCuAl₂, CuAl₂, ve Mg₂Si gibi ikincil fazlar oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 8.b'de XRD analizlerinden görüldüğü üzere SiC takviyesi ile üretilen AA2024 matrisli kompozit malzemelerde ise Al₆Si₂O₁₃ ve Al₂O₃ gibi ikincil fazlarının ve Mg₂Si intermetalik fazının oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 8. AA2024 matrisli B₄C ve SiC takviyeli kompozit malzemelerin XRD desenleri analizi (a) AA2024-B₄C, (b) AA2024-SiC

Şekil 9'da AA6061 alüminyum alaşımına B₄C ve SiC takviyesi ile üretilmiş kompozit malzemelere ait XRD desenleri yer almaktadır. Şekil 9.a'da XRD desenlerin analizlerinden görüldüğü gibi B₄C takviyesi ile üretilen AA6061 matrisli kompozit malzemelerde Al₄C₃, Al₃Ti, Al₃BC ve Al₄SiC₄ gibi ikincil fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 9.b'de XRD analizlerinden görüldüğü üzere SiC takviyesi ile üretilen AA6061 matrisli kompozit malzemelerde de Al₂O₃ ve Al₄C₃ gibi ikincil fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 9. AA6061 matrisli B₄C ve SiC takviyeli kompozit malzemelerin XRD desenleri analizi (a) AA6061-B₄C, (b) AA6061-SiC

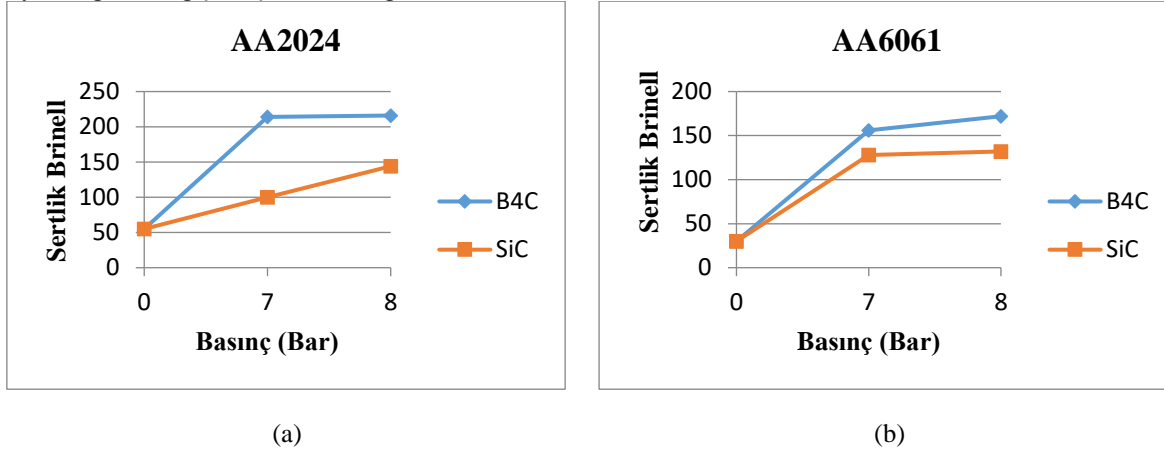
Kompozit malzemelerin sertlik değerleri Tablo 4'de verilmiştir. AA2024-B₄C, AA2024-SiC, AA6061-B₄C ve AA6061-SiC matrisli kompozit malzemelerin basınç değerleri artırılmasıyla sertlik değerlerinde de artış meydana gelmiştir. B₄C takviyeli kompozit malzemelerin SiC takviyeli kompozit malzemelere göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip oldukları kaydedilmiştir. Bunun sebebi olarak B₄C takviyeli kompozit malzemelerin SiC takviyeli kompozit malzemelere göre daha az poroziteye sahip olmasıdır. Yani, B₄C takviyesi malzemesinin toz tane boyutu ortalaması 45 µm iken, SiC takviyeli kompozit malzemesinin toz tane boyutu ortalama 37 µm olmasından dolayı SiC takviyesi malzemesinin B₄C takviye malzemesine göre toz boyutu daha küçük olduğundan porozite miktarı daha çok olmuştur. AA6061 matrisli kompozit malzemelere uygulanan basınç miktarı değişimi ile sertlik

değerindeki artış AA2024 matrisli kompozit malzemelere nazaran daha fazla orandadır. Bu farklılığın kaynağı olarak AA6061 alüminyumun, sertlik özelliklerini iyileştirmede olarak kullanılması olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4. Kompozit malzemelerin sertlik değerleri

<i>Matris</i>	<i>Takviye Elemanı</i>	<i>Basınç Değeri</i>	<i>Kütlesel Sertlik (HBW)</i>
AA 2024	B ₄ C	7	214
AA 2024	B ₄ C	8	216
AA 2024	SiC	7	100
AA 2024	SiC	8	144
AA 6061	B ₄ C	7	156
AA 6061	B ₄ C	8	172
AA 6061	SiC	7	128
AA 6061	SiC	8	132

Tablo 4'deki deney verilerine göre, AA2024 ve AA6061 matrisli kompozit malzemeler ve bu matrislere üretim aşamasında farklı oranlarda uygulanan basınç değerleri ile takviye edilen B₄C ve SiC takviyeleriyle oluşan kütleli sertliklerinin matris bileşimi ile meydana gelen değişimi Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. Farklı basınç oranlarında basılan kompozit malzemelerin sertlik değerlerindeki değişim grafiği (a) AA2024 Matrisli kompozit malzemelerin sertlik değişim grafiği, (b) AA6061 Matrisli kompozit malzemelerin sertlik değişim grafiği

Şekil 10'daki grafiklerden yararlanılarak AA2024 alüminyum alaşımının sertlik değeri 55 HBW iken AA2024 matrisli malzemeye takviye edilen her iki takviye elemanı ile sertlik değerinin arttığı belirlenmiştir. AA2024 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemesinde 7 bar basınçta infiltre edilerek elde edilen kompozit malzemelerin sertlik değerinde %74.30, 8 bar basınçta infiltre edilerek elde edilen kompozit malzemelerin sertlik değerinde ise %74.53 oranında artış olmuştur. AA2024 matrisli SiC takviyeli kompozit malzemesinde 7 bar basınçta infiltre edilerek elde edilen kompozit malzemelerin sertlik değerinde %45, 8 bar basınçta infiltre edilerek elde edilen kompozit malzemelerin sertlik değerinde ise %61.80 oranında artış gözlemlenmiştir. AA6061 alüminyum alaşımının sertlik değeri ise 30 HBW iken AA6061 matrisli malzemeye takviye edilen her iki takviye elemanı ile sertlik değerinin arttığı tespit edilmiştir. AA6061 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemesinde 7 bar basınçta infiltre edilerek elde edilen kompozit malzemelerin sertlik değerinde %80.77, 8 bar basınçta infiltre edilerek elde edilen kompozit malzemelerin sertlik değerinde ise %82.55 oranında artış meydana gelmiştir. AA6061 matrisli SiC takviyeli kompozit malzemesinde 7 bar basınçta infiltre edilerek elde edilen kompozit malzemelerin sertlik değerinde %76.56, 8 bar basınçta infiltre edilerek elde edilen kompozit malzemelerin sertlik değerinde ise %77.27 oranında artış gözlemlenmiştir. Kompozit malzemenin basınca bağlı sertlikte yaşanan bu artış, mikroyapı görüntüleri ile elde edilen porozitedeki azalış ve XRD analizleriyle ile belirlenen ikincil fazların çökmesinden (Mg₂Cu, Al₃Cu₂, MgCuAl₂, CuAl₂, Al₄C₃, Al₆Si₂O₁₃, Mg₂Si, Al₂O₃ gibi) kaynaklanmaktadır.

Kompozit malzemelerin basma dayanımlarında meydana gelen değişimler Tablo 5'de yer almaktadır. AA2024-B₄C, AA2024-SiC, AA6061-B₄C ve AA6061-SiC matrisli kompozit malzemelerin basınç değerlerinin artırılmasıyla basma dayanımında bir yükseliş oluşmuştur. Basma dayanımındaki artışlar, sertlik ölçümleriyle ve poroziteyle eşdeğer şekilde örtüşmektedir.

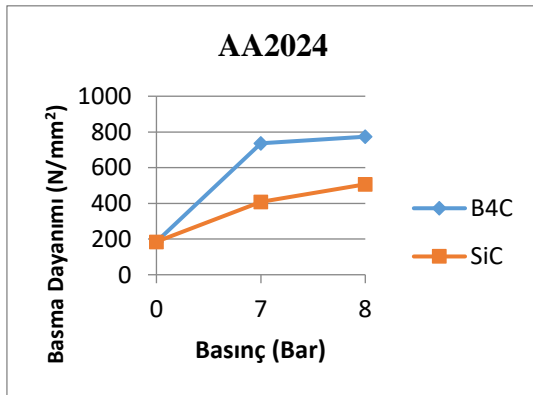
AA2024 alüminyum alaşımının basma mukavemeti 185 MPa iken, AA2024 matrisli malzemeye takviye edilen her iki takviye elemanı ile basma dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir. AA2024 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemesinde 7 bar basınçta infiltre edilerek elde edilen kompozit malzemelerin basma dayanımlarında %74.86 oranında, 8 bar basınçta infiltre edilerek elde

edilen kompozit malzemelerin basma dayanımlarında ise %76.06 oranında artış olduğu saptanmıştır. AA2024 matrisli SiC takviyeli kompozit malzemesinde 7 bar basınçta infiltre edilerek elde edilen kompozit malzemelerin basma dayanımlarında %54.54 oranında, 8 bar basınçta infiltre edilerek elde edilen kompozit malzemelerin sertlik değerinde ise %63.43 oranında artış olduğu belirlenmiştir. Bu durum, sertlik sonuçlarıyla da paralellik göstermektedir. Basma mukavemetinde meydana gelen bu artış, çökelen ikincil fazların yanı sıra, basıncın etkisi ile ıslatabilirlikteki iyileşme, matrisle takviye elemanı arayüzeyinde daha kuvvetli bir bağlanma sağlamış ve düşük poroziteli kompozit malzemeler üretilmiştir. Matrisle takviye elemanı arasında oluşan daha güçlü bağlanma, basma dayanımını pozitif yönde etkilemiştir. Mg₂Si intermetalikliğinin mukavemeti artırdığı daha önceki çalışmalardan bilinmektedir. AA6061 alüminyum alaşımının basma mukavemeti ise 124 MPa iken, AA6061 matrisli malzemeye takviye edilen her iki takviye elemanı ile basma dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir. AA6061 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemesinde 7 bar basınçta infiltre edilerek elde edilen kompozit malzemelerin basma dayanımlarında %75.10 oranında, 8 bar basınçta infiltre edilerek elde edilen kompozit malzemelerin basma dayanımlarında ise %76.51 oranında artış meydana gelmiştir. AA6061 matrisli SiC takviyeli kompozit malzemesinde 7 bar basınçta infiltre edilerek elde edilen kompozit malzemelerin basma dayanımlarında %67.62 oranında, 8 bar basınçta infiltre edilerek elde edilen kompozit malzemelerin basma dayanımlarında ise %72.32 oranında artış gerçekleşmiştir. Kompozit malzemelerin basma mukavemetlerindeki bu artışlar, iki sebepten kaynaklanabilmektedir. Bu sebeplerin birincisi ve en etkili olanı olarak görülen porozitedeki %90 oranındaki düşüştür, ikinci sebep ise yapıda oluşan ikincil fazlarıdır. Sonuçlardan da görüldüğü üzere basma dayanımındaki artışın sebebi, basınç değerinin artması ile matrisin ıslatabilirliğinin artması sonucunda porozitenin azalmasıdır.

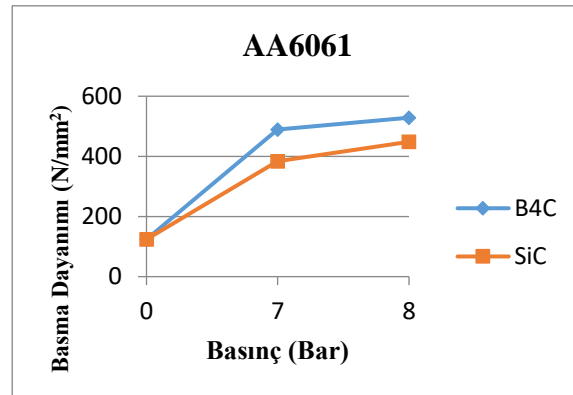
Tablo 5'deki deney verilerinden faydalanılarak, AA2024 ve AA6061 matrisli kompozit malzemelerin maksimum kuvvete basıncın etkisi ile elde edilen basma deney sonuçlarına göre çizilen değişim grafiği Şekil 11'de verilmektedir. Şekil 11'den de görüldüğü üzere en iyi basma mukavemeti, 8 bar basınç altında üretilen kompozit malzemelerde olmuştur.

Tablo 5. Kompozit malzemelerin basma dayanımları

Matris	Takviye Elemanı	Basınç Değeri	Basma Dayanımı (N/mm ²)
AA 2024	B ₄ C	7	736.84
AA 2024	B ₄ C	8	773.33
AA 2024	SiC	7	407.66
AA 2024	SiC	8	506.57
AA 6061	B ₄ C	7	489.58
AA 6061	B ₄ C	8	528.65
AA 6061	SiC	7	383.46
AA 6061	SiC	8	448.33



(a)



(b)

Şekil 11. Farklı basınç oranlarında basılan kompozit malzemelerin basma dayanımı değişim grafiği (a) AA2024 Matrisli kompozit malzemelerin basma dayanımı grafiği, (b) AA6061 Matrisli kompozit malzemelerin basma dayanımı grafiği

Kompozit malzemelerin ısı iletkenlik değeri Lazer flash tekniği kullanılarak, deneysel olarak ölçülmüş ve belirlenen ısı iletkenlik değerleri aşağıda Tablo 6'da verilmiştir. Ölçümler 22 °C'de sabit sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümlerde cihaz, ısı difüzyon değerini ölçtüğünden ısı iletkenlik dolaylı olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada kullanılan yoğunluk ve özgül ısı büyüklüklerinin sıcaklıkla değişmediği varsayılmıştır. Isı iletkenliğinin basınç değerinin artmasıyla azaldığı görülmektedir. Beklenildiği gibi basınç değerinin artması ile kompozit malzemelerin ısı iletkenlik değeri düşmüştür. Basınç artışı ile ısı iletkenliğinin azalması, B₄C ve SiC takviye elemanlarından kaynaklanmaktadır. B₄C ve SiC'ün negatif sıcaklıklarda ısı

iletkenliğinin yükseldiği, oda sıcaklıklarına doğru ve daha yüksek sıcaklıklarda düştüğü bilinmektedir. Basınç değeri artırılarak üretilen kompozit malzemelerin porozite miktarı azalmaktadır. Bunun nedeni, basınç miktarının artırılmasının infiltrasyonu kolaylaştırıcı bir etkiye sahip olması ve eriyiğin mikro düzeydeki partiküller arasına daha iyi nüfuz etmesidir.

Tablo 6. Kompozit malzemelerin ısı iletkenlik değerleri

<i>Matris</i>	<i>Takviye Elemanı</i>	<i>Basınç Değeri</i>	<i>Isıl İletkenlik (W/mK)</i>
AA 2024	B ₄ C	7	107.30
AA 2024	B ₄ C	8	89.41
AA 2024	SiC	7	170.69
AA 2024	SiC	8	120.69
AA 6061	B ₄ C	7	109.47
AA 6061	B ₄ C	8	101.25
AA 6061	SiC	7	158.95
AA 6061	SiC	8	138.94

4. Genel Sonuçlar

AA2024 veya AA6061 matrislerine %50 hacim oranında 48 µm B₄C veya 37 µm SiC partikülleri ile takviye edilmiş 7 ve 8 bar basınç değerleri uygulanarak üretilen kompozit malzemelerin mikroyapı incelemeleri, mekanik deneyleri, SEM analizi, EDS analizi, XRD analizi, sertlik, basma ve termal iletkenlik deneylerinden şu genel sonuçlar elde edilmiştir.

7 bar basınç altında üretilen AA2024 matrisli SiC takviyeli kompozit malzeme ve AA2024 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzeme üretimi ile üretilen kompozit malzemelerin mikroyapı incelemelerinde matrisin takviye elemanını ıslatabildiği görülmüş olup, takviye elemanının homojen şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Porozitenin ise çoğunlukla, ister SiC takviyeli kompozit malzemeler olsun isterse de B₄C takviyeli kompozit malzemeler olsun takviye elemanı ile matris ara yüzeyi etrafında toplanmıştır. XRD analizde ise AA2024 matrisli SiC takviyeli kompozit malzemelerde ve AA2024 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemelerde ikincil fazların oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca AA2024 alüminyum alaşımına SiC takviyesinin infiltrasyon yöntemi ile infiltre edilmesiyle üretilen kompozit malzemelerin alüminyum alaşımının sertlik ve basma mukavemeti değerlerine göre daha iyi sertlik ve basma mukavemeti sağladığı görülmüştür. Aynı şekilde AA2024 alüminyum alaşımına B₄C takviyesinin infiltrasyon yöntemi ile infiltre edilmesiyle üretilen kompozit malzemelerin, alüminyum alaşımının sertlik ve basma mukavemeti değerlerine göre daha iyi sertlik ve basma mukavemeti sağladığı da görülmüştür. 8 bar basınç altında üretilen AA2024 matrisli SiC takviyeli kompozit malzeme ve AA2024 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzeme üretimi ile üretilen kompozit malzemelerde, mikroyapı incelemelerinde ise yine matrisin takviye elemanını ıslatabildiği gözlenmiş olup, takviye elemanının homojen şekilde dağıldığı görülmüştür. Porozitenin ise çoğunlukla, ister SiC takviyeli kompozit malzemeler olsun isterse de B₄C takviyeli kompozit malzemeler olsun takviye elemanı ile matris ara yüzeyi etrafında toplanmıştır. Ancak 7 bar altında üretilen AA2024 matrisli SiC takviyeli kompozit malzemelere ve AA2024 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemelere göre daha az porozite oranına sahip olduğu görülmüştür. XRD analizde ise AA2024 matrisli SiC takviyeli kompozit malzemelerde ve AA2024 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemelerde de aynı şekilde ikincil fazların oluştuğu tespit edilmiştir. Yine üretimi gerçekleştirilen AA2024 matrisli SiC takviyeli kompozit malzemeler ile AA2024 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemelerin, alüminyum alaşımının sertlik ve basma mukavemeti değerlerine göre daha iyi sertlik ve basma mukavemeti sağladığı görülmüştür.

7 bar basınç altında üretilen AA6061 matrisli SiC takviyeli kompozit malzeme ve AA6061 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzeme üretimi ile üretilen kompozit malzemelerin mikroyapı analizlerinde takviye elemanının homojen olarak dağıldığı görülmüş olup, takviye elemanlarının matrisin ıslatabildiği gözlemlenmiştir. Porozitenin meydana geldiği bölgelerin ise, ister SiC takviyeli kompozit malzemeler olsun, isterse de B₄C takviyeli kompozit malzemeler olsun matris ile takviye elemanı ara yüzeyleri olduğu tespit edilmiştir. XRD analizde ise AA6061 matrisli SiC takviyeli kompozit malzemelerde ve AA6061 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemelerde ikincil fazların oluştuğu tespit edilmiştir. Saf alüminyum alaşımların sertlik ve basma mukavemetlerine göre infiltrasyon yöntemi ile üretilen AA6061 alüminyum matrisli SiC takviyeli kompozit malzemeler ile AA6061 alüminyum matrisli SiC takviyeli kompozit malzemelerin daha iyi değerler sergiledikleri gözlemlenmiştir. 8 bar basınç altında üretilen AA6061 matrisli SiC takviyeli kompozit malzeme ve AA6061 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzeme üretimi ile elde edilen kompozit malzemelerde de mikroyapı analizlerinde takviye elemanının homojen olarak dağıldığı gözlenmiş olup, takviye elemanlarının matrisin ıslatabildiği görülmüştür. 7 bar basınç altında üretilen kompozit malzemeler gibi, 8 bar basınç altında üretilen kompozit malzemelerde de porozitenin oluştuğu bölgelerin, ister SiC takviyeli kompozit malzemeler olsun, isterse de B₄C takviyeli kompozit malzemeler olsun matris ile takviye elemanı ara yüzeyleri olduğu tespit edilmiştir. Fakat 7 bar altında üretilen AA6061 matrisli SiC takviyeli kompozit malzemelere ve AA6061 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemelere göre daha az porozite oranına sahip olduğu görülmüştür. XRD analizde ise AA6061 matrisli SiC takviyeli kompozit malzemelerde ve AA6061 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemelerde ikincil fazların oluştuğu tespit edilmiştir. Sertlik ve basma mukavemetleri

infiltrasyon yöntemi ile üretilen AA6061 alüminyum matrisli SiC takviyeli kompozit malzemeler ile AA6061 alüminyum matrisli SiC takviyeli kompozit malzemelerin saf alüminyum alaşımlarına göre daha iyi değerler sergiledikleri gözlemlenmiştir.

Tüm kompozit malzemelerin mikroyapı incelemelerinde takviye malzemelerin homojen dağıldığı gözlemlenmiş olup matrisin takviye elamanlarını ıslatabildiği gözlemlenmiştir. Üretilen kompozit malzemelerde porozite genel olarak takviye matris arayüzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Basınç miktarı arttıkça, porozite hacim oranlarında büyük ölçüde azama meydana gelmiştir. Bunun nedeni basınç miktarının artırılması infiltrasyonu kolaylaştırıcı bir etkiye sahip olması ve eriyiğin mikro düzeydeki partiküller arasında daha iyi nüfuz etmesini sağlamasıdır. Porozite miktarının SiC takviyeli kompozitlerde daha fazla olduğu gözlemlenmiş olup, bunun sebebinin takviye elamanlarının toz boyutlarındaki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan analizlere göre infiltrasyon basıncının artması ile mekanik özelliklerde iyileşmeler gözlemlenmiştir. Basınç miktarının artması ile kompozit malzemelerin sertlik ve basma mukavemeti değerlerinde %80 oranlarına varan artış gözlemlenmiştir. Kompozit malzemenin basınca bağlı sertlikte yaşanan bu artış mikroyapı görüntüleri ile elde edilen porozitedeki azalış ve XRD analizleriyle belirlenen ikincil fazların çökmesinden (Mg_2Cu , Al_3Cu_2 , $MgCuAl_2$, $CuAl_2$, Al_4C_3 , $Al_6Si_2O_{13}$, Mg_2Si , Al_2O_3 gibi) kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Kompozit malzemelerin basma mukavemetlerindeki artışlar ise iki sebepten kaynaklanabilmektedir. Bu sebeplerin birincisi ve en etkili olanı olarak görülen porozite oranındaki düşüş, ikinci sebep ise yapıda oluşan ikincil fazlardır. Sonuçlardan da görüldüğü üzere basma dayanımındaki artışın sebebi basınç değerinin artması ile matrisin ıslatabilirliğinin artması sonucunda porozitenin azalmasıdır. AA6061 matrisli kompozit malzemelerdeki en yüksek mukavemet değeri AA2024 matrisli kompozit malzemelerde de olduğu gibi 8 bar basınç altında üretilen kompozit malzemelerde elde edilmiştir. Bu durumun hem sertlik sonuçları ile, hem porozitede meydana gelen düşüş ile, hem de SEM görüntü analiz sonuçlarıyla birebir örtüştüğü sonucuna varılmıştır. Basınç değerinin artmasıyla ısıl iletkenlik değerlerinde düşüş yaşandığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada aynı üretim yöntemi ve üretim şartları içerisinde farklı takviye elamanlarının kompozit malzemenin mekanik ve içyapı özelliklerine etkisi net olarak incelenerek literatürdeki bu açığın giderilmesi sağlanmıştır. Yapılacak olan yeni çalışmalarda üretilen bu kompozit malzemelerin aşınma davranışları ve korozyon özelliklerinin incelenmesi yapılabilir.

Kaynakça

- Aguliar-Martinez J. A., Pech-Canul M. I., Rodriguez-Reyes M. and De Lapena J. L., (2003). Effect of processing parameters on the degree of infiltration of SiCp preforms by Al-Si-Mg alloys, *Materials Letters*, 57(26-27), 4332-4335.
- Ahlatçı, H., Candan, E. and Çimenoglu, H., (2002). Effect of particle size on the mechanical properties of 60 vol. % SiC_p reinforced Al matrix composites, *Zeitschrift für Metallkunde*, 93(4), 330-333.
- Ahlatci, H., Koçer, T., Candan, E. and Çimenoglu, H., (2006). Wear behaviour of Al/(Al₂O_{3p}+SiC_p) hybrid composites, *Tribology International*, 39(3), 213-220.
- Ateş S., Uzun, I., Çalın R. and Çıtak R., (2012). Effect of Infiltration Pressure on Thermal Conductivity of Al 2014 Matrix Composite Powered by Silicon Carbide, *Asian Journal of Chemistry*, 24(1), 76-80.
- Ateş, S. & Kızılok E., (2011). Basıncılı infiltrasyon ile üretilen SiC/Al₂O₁₄ kompozitlerin özelliklerine infiltrasyon sıcaklığının etkisinin tek yönlü varyans analizi ile incelenmesi, *International Journal of Research and Development*, 3(1), 50-54.
- Benal, M.M. and Shivanand, H.K., (2007). Effects of reinforcements content and ageing durations on wear characteristics of Al (6061) based hybrid composites, *Wear*, 262(5-6), 759-763.
- Buhrmaster C. L., Clark D. E. and Smart H. B. (1988). Spray Casting Aluminum and Al/SiC Composite, *Journal of Metals*, 40(11), 44-45.
- Chong, Y., Atkinson, H.V., Jones, H., (1993). Effect of ceramic particle size, melt superheat, impurities and alloy conditions on threshold pressure for infiltration of SiC powder compacts by aluminium-based melts, *Materials Science and Engineering*, A173, 233-237.
- Çevik E. and Sun Y., (2015). Mechanical and Tribological Behaviour of B₄C Reinforced AlSi₁₂-XMg Matrix Composites, *Journal of The Balkan Tribological Association*, 21(4), 725-735.
- Çevik, E., Sun Y., Ahlatçı H. and Türen Y. (2016). Influence of Mg addition on B₄C reinforced Al and Al₁₂Si matrix composites production by pressure infiltration technique *Metal Science and Heat Treatment*, 58, 357-361.
- Gedeon, S. A., and Tangerini, I., (1991). A new method for bonding metal matrix composite inserts during casting, *Materials Science and Engineering A*, 144(1-2), 237-240.
- Hamzawy, E. M., El-Kheshen, A. A., Zawrah, M. F., (2005). Densification and properties of glass/cordierite composites, *Ceramics International*, 31(3), 383-389.
- Liu, Y. R., Liu, J. J., Zhu, B. L., Luo, Z. B. and Miao, H.Z., (1997). The computer simulation of the temperature distribution on the surface of ceramic cutting tools, *Wear*, 210(1-2), 39-44.

- Mazaheri Y., Meratian M., Emadi R. and Najarian A.R., (2013). Comparison of microstructural and mechanical properties of Al-TiC, Al-B₄C and Al-TiC-B₄C composites prepared by casting techniques, *Materials Science & Engineering, A*, 560, 278-287.
- Narciso, J., Louis, E., Garcia-Cordovilla, C., (1997). Pressure infiltration of packed SiC and alumina particulates by liquid silver with dissolved oxygen, *Proceedings of International Conference High Temperature Capillarity* 283.
- Şahin, Y., (2003). Preparation and some properties of SiC particle reinforced aluminium alloy composites, *Materials and Design*, 24(8), 671-679.
- Sevim I., Sahin S., Çuğ H., Çevik E., Hayat F. and Karali M., (2014). Effect of Aging Treatment on Surface Roughness, Mechanical Properties, and Fracture Behavior of 6XXX and 7XXX Aluminum Alloys, *Strength of Materials*, 46(2), 190-197.
- Stefanescu D. M., Dhindaw D. K. and Ahuja S., (1992). Authors' reply, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 23(8), 2328-2330.
- Zweben C., (1998). Advances in composite materials for thermal management in electronic packaging. *JOM (The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society)*, 50(6), 47-51



An Experimental Study To Determine Sliding Shear Strength And Internal Friction Coefficient Of Clay Brick Wall In A Masonry Building

Orhan Doğan¹ , Orhan Gazi Odacıoğlu¹ 

¹ Department of Civil Engineering Faculty of Engineering Kırıkkale University, 71451, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 27/03/2019

Kabul/Accepted: 02/06/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Abstract

96% of the available buildings in use in Turkey are taking place in the earthquake zone and approximately 50% of them are masonry structures built using bricks. Sliding shear strength and internal friction coefficient were taken as a constant value in Turkish Earthquake Code (TSC 2007) depending on the type and hole rate of the brick section regardless of available compressive strength of the brick, mortar and plaster of a wall. But nowadays these values are recommended to be taken according to the compressive strength of mortar in TSC-2018. In addition, with this study it is recommended that, to evaluate the performance of a building against earthquake, the mechanical properties of the materials used for a building must be determined on site with series of tests. It is well-known that for each building mechanical properties of mortar and plaster are variable because of site work conditions.

In this study, a couple of tests were conducted in different storeys of a five-storey-masonry building representing the clay brick masonry buildings in the country built in the 1950s, to determine the sliding shear strength and internal friction coefficient, using a similar method to shove test. With the increment of axially vertical load from upper storey to lower storey, the shear capacity in the lower storeys of the building are much lower than the respective values in upper storeys. In order to determine a characteristic shear force for the building, it has been revised considering the lowest compressive strength of mortar in the storeys. Related with the internal friction coefficient obtained, a quite good correlation was found between the results and the standards. However, the sliding shear strength was found to be approximately three times higher than TSC 2007 and about two times higher than TSC 2018. This means that, the limits recommended in the standards are much safer than results obtained from the tests.

Key Words

"Masonry Building, Sliding Shear Strength, Risk Analysis of Masonry Buildings, Clay Bricks, Internal Friction Coefficient, Shove Test"

1. Introduction

The masonry structures are the combination of different types of wall materials like stone, brick, adobe bims-block with a lower strength and more flexible bonding mortar and plaster in comparison to the wall materials. In Turkey, which has seen a major earthquake about in every 30 years, it is of great importance to ensure the structural safety of the masonry structures.

Before the steel and reinforced concrete structures became widespread, masonry brick was generally used to build up low-storey buildings in Turkey. However, even though the block brick made of clay is produced at the same dimensions (Dalkılıç & Nabikoğlu, 2017), in the same mixing ratio and in the same section, the pressure strengths of bricks vary depending on the degree of heat treatment (Cultrone et al., 2004) and types of furnace (Bayülke N., 2013; Lourenço P.B. et al., 2010). Similarly the mortar and plaster have also different strengths depending on different rates of mixture (sand-cement-lime-water) (Haach et al., 2010) because of the master factor, different weather conditions (Berhane Z., 1984), different shapes, granule and pollution ratio of the sand and also different environmental effects (Almusallam A., 2001) of construction site. Because of these reasons, the shear and compressive strengths of bricks, mortar and plaster can vary from building to building and even in different storeys of a building.

Shear strength resisting the lateral earthquake force stems from the bond called sliding shear strength and residual frictional force that develops after the failure of the bond at the interface of brick and mortar. Different experimental models and methods are used to determine the sliding shear strength and frictional force between mortar and brick such as shove (Ispir M. et al., 2010; Ferretti F. et al., 2019), Nuss, triplet, core (Rahman A. & Ueda T., 2013), Van der Pluijm (Pluijm R., 1992) etc. Shove test is an in-situ test to determine the sliding shear strength and frictional force of a brick wall making a brick slid in mortar. According to Coulomb's law, the sliding shear stress in the standards is variable according to the compressive strength of the mortar or the type and hole ratio of the brick, but the internal friction coefficient is constant. The standard EN 1052-3 triplet laboratory test in Europe may result in significant differences according to the laboratory-simulated in-situ tests (Bonura V. et al., 2018; Andreotti G. et al., 2018).

Performance analysis of the existing buildings including monumental buildings (Ozturk B., 2008; Ozturk B., 2017) against earthquake and their renovation or strengthenings are encouraged and even imposed by the Turkish Government in recent years. According to the Turkish codes (TSC 2018; TSC 2007), the performance of an existing masonry building against earthquake is evaluated only according to the sliding shear performance of its walls.

The aim of this study is to investigate the sliding shear strength and friction coefficient of a wall in an existing masonry building, depending on the variable exposed wall loads and the strength of the plaster and mortar, varying in different floors of the building, instead of taking these parameters constant for a building as indicated in the TSC-2018 Code.

2. Materials and Testing Method

2.1. Structural Properties

The building (with ground floor 19,50x11 meters in size, each floor 3 meters in height, 14 and 27 cm wall thicknesses and 12 cm floor slab thicknesses), chosen in this study as a sample for the tests, had been primarily constructed as a 4-storey residence with clay block brick in Ankara built in 1950's, province as shown in Figure 1. But later on, in 1955 an additional 5th floor was built using vertical perforated brick with less than 35% hole ratio. It is seen that two types of clay bricks in the same sizes of 215x102x65 mm were used for the building in which total wall thickness is about 27 cm, plaster thicknesses on two sides of the wall are 3-3.5 cm in total and bed joint and head joint mortar thickness is 1.5-2 cm between bricks.

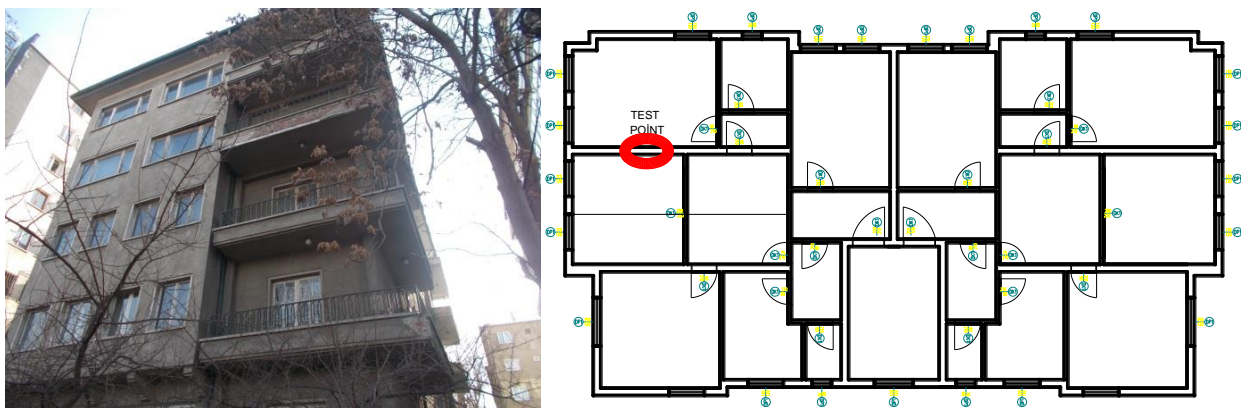


Figure 1: Front facade of the building and storey plan

2.2. Preparation of Test Specimens and Instrumentations

The specimens prepared on the 2nd, 3rd and 5th storeys are 3 rows of bricks in height and 1.5 bricks in length. The specimen prepared on the 4th storey is 3 rows of bricks in height and 2 bricks in length as given Table 1. Taking bricks out of the wall, two limited gaps formed on the both sides of the specimens, to set up the hydraulic jack in one and the dial gage to the other gap. It is

aimed to investigate sliding shear performance in mortars taking place on the top and bottom of the specimen, applying quasi-static lateral load from one side of the specimen with hydraulic-jack and measuring lateral displacement from other side of the specimen with dial-gage. The deformed surface of the specimen taking place on the loading side is filled with repair mortar smoothly to apply the lateral distributed load uniformly without damaging the existing plaster taking place on both surfaces of the wall.

Table 1. Sizes of the specimens for each storey

Storey	Type of brick	Width (cm)	Height (cm)	Thickness of wall (cm)	Thickness of mortar (cm)	Thickness of plaster (cm)	Total thickness (cm)
2	Clay Brick	35	24	22	2	2-3	27
3	Clay Brick	34	26	22	1.5-2	2-3	27
4	Clay Brick	48	23	22	2	2-3	27
5	Hollow Clay Brick	36.5	24	22	2	2-3	27

2.3. Testing Method

In order to determine in situ shear strength of masonry walls, specimens were prepared according to the Method B given in ASTM C 1531-03 as shown in Figure 2. In Method B only one brick is prepared as a specimen but in the this study more than one brick is prepared to avoid deformation of small specimen during preparation and to investigate size effect. Specimens were prepared on the same axis and in the same locations but on different floors.

The quasi-static load was applied laterally with a hydraulic jack and a pump unit and the lateral displacement of the test unit was measured using a dial-gage. During the tests the lateral cracks in the top and the bottom bed joint mortar was occurred. The test was carried out until reaching residual sliding shear which is approximately 10% of maximum load. The failure of the specimen is primarily occurred in plaster then occurred in mortar bond in the upper and lower sides of the specimen.

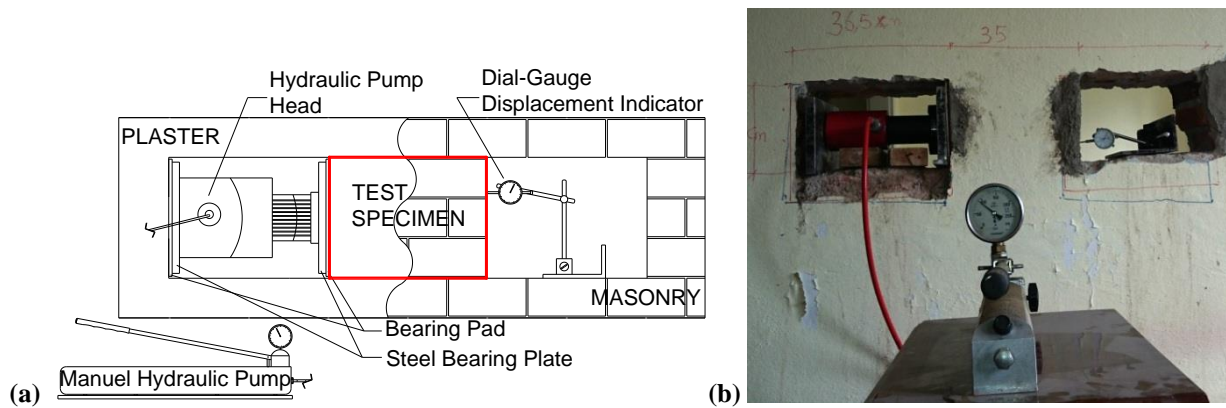


Figure 2: (a) Testing model design and instrumentation (b) Test model and loading system

3. Analysis Of The Test Results

3.1. Analysis of axial compression load acting on the test specimen

Herein as indicated the Method B of ASTM C 1531-03 Code, the vertical axial force caused by the building's own weight acting on the test specimens, were calculated for each specimen on different storeys as shown in the Figure 2.(a). The load distribution on the wall and the particular load acting on the specimen and the vertical section of the wall are shown in Figure 3.

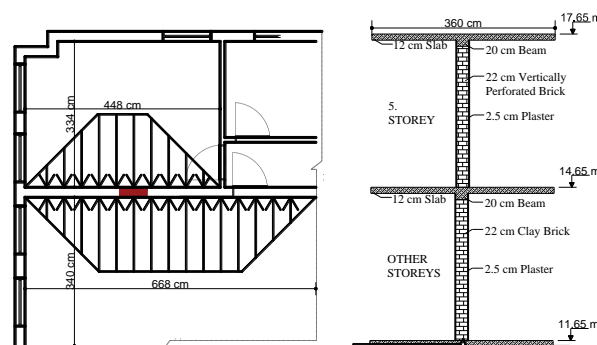


Figure 3. Load distribution acting on the wall and the specimen and the vertical section of the wall

A simplistic comparison of the parameters determined through laboratory shove tests with those obtained via triplet tests may result in significant differences as a result of the wrong estimation of the compressive stress acting on the mortar joints (σ_j) in the shove test (Andreotti G. et al., 2018). That is why to ensure about the compressive stress acting on the mortar joints (σ_j) in the shove test, the compressive stress acting on the specimen is calculated mathematically using structural geometry and compared with the results of 3D (StatiCAD) structural analysis program and quite good correlation obtained between these two results.

The vertical load applied on the wall and the specimen was calculated according to the TS 771-1 code. The density of the wall with plaster, the reinforced concrete, the ceiling plaster, the floor leveling concrete and weight of the roof covering in square meter are recommended as 1800 kg/m³, 2400 kg/m³, 2000 kg/m³, 2000 kg/m³ and 150 kg/m² respectively in the TSC 2007 and TS 498 codes.

The wall height and thickness (including plaster), the thickness of the mortar and plaster mortar and the dimensions of the bricks were measured.

3.2. Analysis of shear strength

It has been observed that the ultimate shear forces (τ_u) varied between 101 and 197 kN. The main reasons of this variation in shear load capacity are the higher sizes of the specimen and the higher strength of the mortar on the fourth floor in comparison to the other floors. The specimens showed a rapid loss of shear stress after reaching at the ultimate shear forces varying between 101.1 and 196.7 kN and the optimum displacement varying between 2.56 and 4.20 mm as shown in Figure 4. and Table 2.

Table 2. Shear force and displacements of the specimen

Storey	T_u	Δ_u	T_r	Δ_r
	kN	mm	kN	mm
2	125.5	2.56	12.0	46.41
3	112.0	4.20	12.4	45.70
4	196.7	3.40	63.7	40.03
5	101.1	2.55	23.3	46.85

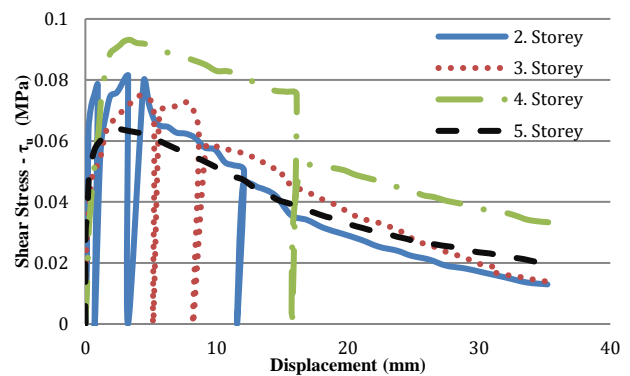


Figure 4. Shear stress and displacement

The ultimate shear stress (τ_u) and residual shear stress τ_r were calculated by dividing the acted lateral shear force (τ) on the specimen with the total top and bottom shear areas (A) of the specimen. The correlations between the ultimate shear and compression stresses are given in the equation 1, in Table 3 and in Figure 5 (a).

After reaching the ultimate shear strength, the tests were carried out until a residual frictional force was attained. It was found that the ratio of the residual frictional force to the ultimate shear force was obtained as 1/10 for the block bricks and as 1/5 for the perforated bricks. During the test on the second floor, the specimen behaved as an elasto-plastic material before reaching ultimate strength. After the ultimate strength, it was unloaded and loaded. It behaved completely plastic after the unloading process without adherence crack as shown in Figure 4.

3.3. Reconsideration of sliding shear stress using hammer rebound reading of the mortar

N-Schmidt hammer test was used as a non-destructive and quick test method, to determined compressive strength of brick, mortar and plaster. A big difference was observed in compressive strength of brick, mortar and plaster in different floors in the hammer readings. Therefore instead of taking constant mechanical properties for all masonry buildings, the variation of mechanical properties of wall materials and the quality of the construction was taken care during reconsideration of sliding shear stress. It was determined that while the mortar and plaster results giving very close readings to each other, the general average readings of the mortar and plaster were 50% less than the average reading of the brick. So the most effective parameter in determination of the wall shear performance is the determination of mortar and plaster strength as the weakest chain of the wall. Therefore N-Schmidt reading of the mortar and plaster can have a priority in the determination of the wall shear performance as the most practical method. To evaluate sliding shear stresses all together, these differences between the results were reconsidered using only for hammer rebound readings of the mortar instead of brick.

Average rebound reading of the fourth floor mortar was quite higher than the other floor mortars. Because of the higher rebound reading and shear stress of mortar on the fourth floor, the regression R^2 of the Equation-1 was 0.13. To eliminate this uncertainty in regression analysis, ultimate shear strengths were revised by dividing the ultimate shear stresses to the ratios which is calculated by dividing the different floor rebound readings to the lowest rebound reading of third floor. The regression analysis of revised shear values (τ_{ur}) is more meaningful and compatible with the regression R^2 of the Equation-2 was 0.89. Non-revised and revised shear values and graphics are given in Table 3 and Figure 5 (a).

$$\tau_u = 0.58 + 0.24\sigma_n \tag{1}$$

$$\tau_{ur} = 0.45 + 0.42\sigma_n \tag{2}$$

Table 3. N-Schmidt hammer test rebound readings for brick, mortar and plaster and the axial stresses, non-revised and revised shear stresses acting on the specimens and lateral displacements

Storey	N-Schmidt hammer test rebound readings			Strain and displacements						
	Brick	Plaster	Mortar	σ_n MPa	τ_u MPa	τ_r MPa	Ratios	τ_{ur} MPa	Δ_u mm	Δ_r mm
2	26.50	19.50	12.00	0.44	0.66	0.06	1.09	0.61	2.56	46.41
3	32.50	15.25	11.00	0.32	0.61	0.07	1.00	0.61	4.20	45.70
4	28.50	15.00	16.00	0.20	0.76	0.25	1.45	0.52	3.40	40.03
5	49.75	12.50	12.00	0.09	0.52	0.12	1.09	0.48	2.55	46.85
Average	34.31	15.57	13.25							

The sliding shear strength and friction coefficient between the brick and the mortar interface of the masonry walls are found different from the individual codes as seen in Table 4 and Figure 5 (b). The ASTM C1531-03 code indicates that the friction coefficient varies in the range of 0.3-1.6 MPa while the sliding shear strength does not give a specific value for the cracking resistance. TSC 2018 code specifies that the sliding shear strength will be in the range of 0.2 MPa depending on the range of 2-9 MPa compressive strength of the mortar, while the friction coefficient is 0.4. While the TSC 2007 code does not consider the strength of the mortar, it accepts that the friction coefficient is only 0.5 and sliding shear strength varies depending on the type and sectional hole rate of the bricks. This study showed that the compressive strength of the mortar and even the plaster are the two most important parameters in determining sliding shear strength. Because the strength of the brick is higher than the strength of the mortar and plaster, TSC 2018 code recommends that sliding shear strength is based on only compressive strength of mortar. In addition, if the strength of the plaster is different from the mortar, the strength of the plaster should also be taken into consideration. In this study, the mortar and the plaster with 5 MPa compression strength, gathered using hammer readings and evaluating according to the technical research of Szilágyi and Borosnyói (2009), gave about 0.45 MPa sliding shear strength and 0.42 friction coefficients.

Table 4. Shear stress and friction coefficient of codes and test results

		Material properties	τ_o	μ
ASTM C 1531-03		Block and perforated concrete and clay bricks	-	0.3-1.6
		Mortar (M1-M2)	0.10	
EN 1996-1-1 (2006) and TSC (2018)		Mortar (M2-M9)	0.20	0.4
		Mortar (M10-M20)	0.30	
TSC (2007)		Clay bricks	0.15	0.5
Test results		Clay Block Bricks - Mortar (approximately 5 MPa)	0.45	0.42

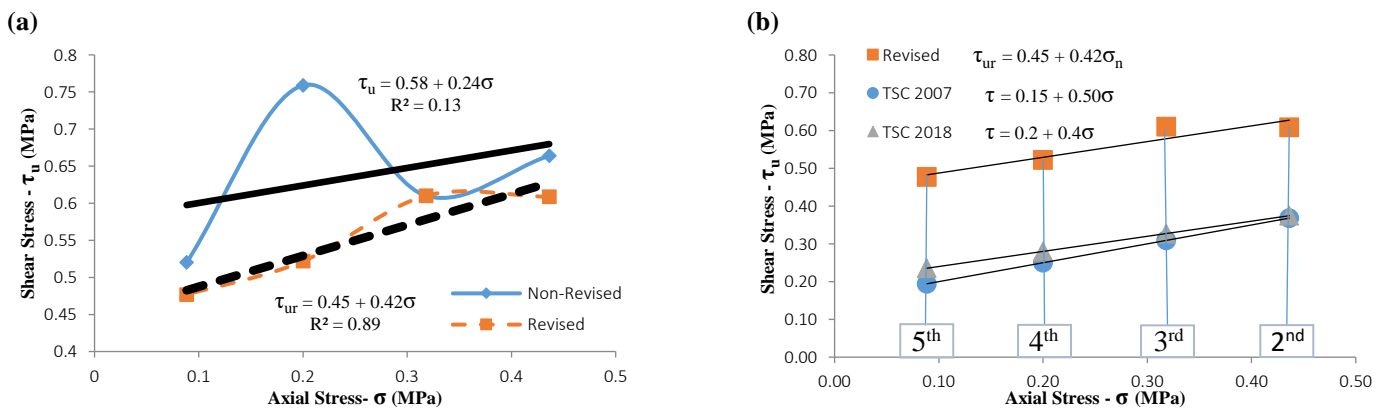


Figure 5. (a) Non-revised and revised shear and axial stress (b) Comparison of test results with the codes

4. Conclusions and suggestions

In this study, it is understood that the mechanical properties of the masonry walls used mortar is variable for every building even every storey in a building because of the percentages of cement and lime components in mortar. Series of tests were conducted in different storeys of a five-storey masonry building built in the 1950s, to determine the sliding shear strength and internal friction coefficient, using a shove testing method similar to the one given in the ASTM C 1531-03 code.

Consequently;

- It is found that the ratio of the residual frictional strength to the ultimate shear strength is approximately 1/10 for block bricks and 1/5 for hollow brick. The residual frictional strength of vertical perforated bricks is two times more than the residual frictional strength of block bricks. Quasi-static tests showed that after reaching the ultimate shear strength, they behaved completely plastic.
- It is seen that to determine a single sliding shear strength for a masonry building analysis, it is a better to use experimentally determined shear strength of each storey, because mechanical properties of the mortar and plaster vary for each storey, instead of taking a constant value for all storeys.
- This study showed that the compressive strength of the mortar and even the plaster are the two most important parameters in determining sliding shear strength, since the strength of the brick is higher than the strength of the mortar and plaster. That is why in this study to investigate the sliding shear strength of masonry, only compressive strength of mortar and plaster is taken care.
- When this study carried out, TSC 2007 code was in valid and it was not considering the strength of the mortar and plaster, but it was accepting the friction coefficient is constant and the sliding shear strength varies depending on the type and sectional hole rate of the vertical perforated bricks, In the meantime ASTM C 1531-03 and TSC 2018 codes specify these values depending on only the mortar. In this study it is determined that the mortar and the plaster with about 5 MPa compressive strength gave 0.45 MPa sliding shear strength and 0.42 friction coefficients.
- The test results about internal friction coefficient were found quite compatible with the codes (ASTM C 1531-03, TSC 2018). However, the ultimate shear strength achieved for block bricks built with 5 MPa mortar, was found approximately three times more secure than TSC 2007 code and about two times more secure than TSC 2018.
- If the correlation can be proved, instead of using a destructive shove test method as recommended in ASTM C 1531-03 code, the N-Schmidt hammer test can be used as a non-destructive method which is more practical to determine the shear performance of the masonry buildings depending on the compressive strength of mortar and plaster.

Referanslar

- Almusallam, A.A. (2001). Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete. *Cement and Concrete Composites*, 23(4-5), 353-361.
- Andreotti, G., Graziotti, F., & Magenes, G. (2018). Detailed micro-modelling of the direct shear tests of brick masonry specimens: the role of dilatancy. *Engineering Structures*, 168, 929-949.
- ASTM C 1531-03 (2003). Standard Test Method for In Situ Measurement of Masonry Joint Shear Strength Index. West Conshohocken, United States.
- Bayülke, N. (2003). *Yığma yapılar Taş ve Tuğla*. IMO Yayınları. Ankara.
- Berhane, Z. (1984). Evaporation of water from fresh mortar and concrete at different environmental conditions. In *Journal proceedings*, 81(6), 560-565.
- Bonura, V., Jafari, S., Zapico Blanco, B., & Graziotti, F. (2018). Interpretation of in situ shear test for brick masonry: a benchmark study. In *Proceedings of the 16th European conference on earthquake engineering*, 16ECEE. 18-21.
- Cultrone, G., Sebastián, E., Elert, K., De la Torre, M. J., Cazalla, O., & Rodriguez-Navarro, C. (2004). Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(3), 547-564.
- Dalkilic, N., & Nabikoglu A. (2017). Traditional manufacturing of clay brick used in the historical buildings of Diyarbakir (Turkey). *Frontiers of Architectural Research*. 6(3). 346-359
- EN 1996-1-1 (2006) Eurocode 6: Design of masonry structures-General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. CEN, EU.
- Ferretti, F., Ferracuti, B., Mazzotti, C., & Savoia, M. (2019). Destructive and minor destructive tests on masonry buildings: Experimental results and comparison between shear failure criteria. *Construction and Building Materials*, 199, 12-29.
- Haach, V. G., Vasconcelos, G., & Lourenço, P. B. (2011). Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2980-2987.

- Ispir, M., Demir, C., Ilki, A., & Kumbasar, N. (2009). Material characterization of the historical unreinforced masonry Akaretler row houses in Istanbul. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(7), 702-713.
- Lourenço, P. B., Fernandes, F. M., & Castro, F. (2010). Handmade clay bricks: Chemical, physical and mechanical properties. *International Journal of Architectural Heritage*, 4(1), 38-58.
- Ozturk, B. (2008). Investigation of seismic behavior of a monumental building in Historical Cappadocia Region of Turkey. In 14th world conference on earthquake engineering, Beijing, China.
- Ozturk, B. (2017). Seismic behavior of two monumental buildings in historical Cappadocia region of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(7), 3103-3123.
- Rahman, A., & Ueda, T. (2013). Experimental investigation and numerical modeling of peak shear stress of brick masonry mortar joint under compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(9), 1-12. doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000958
- Szilágyi, K., & Borosnyói, A. (2009). 50 years of experience with the Schmidt rebound hammer. *Concrete Structures*, vol 10, 46-56.
- TS 498 (1997) Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri. Ankara, Turkey.
- TS EN 12504-2 (2004) Testing concrete in structures, part-2 non-destructive testing, determination rebound number, Standard. Ankara, Turkey.
- TS EN 771-1 (2005) Specification for Masonry Units—Part 1: Clay Masonry Units. Ankara, Turkey.
- TSC (2007). Specification for buildings to be built in earthquake zones. Ministry of Public Work and Settlement, Ankara, Turkey
- TSC (2018) Turkish Earthquake Code: Specifications for Building Design Under Earthquake Effects. Ministry of Public Work and Settlement, Ankara, Turkey
- Van der Pluijm, R. (1992). Material properties of masonry and its components under tension and shear. In Proceedings 6th Canadian Masonry Symposium, 15-17 June 1992, Saskatoon, Canada. 675-686. University of Saskatchewan.



Şarj Bitme Kaygısı ve Şarj İhtiyacıyla İlgili Olumsuz Duyguların Mobil Uygulama Enerji Tüketim Beklentisinde Rolü: Kırıkkale İlinde Bir Araştırma

The Role of Charging-Out Anxiety and Negative Emotions Related to Charging Needs in Mobile Application Energy Consumption Expectations: A Research in Kırıkkale Province

İbrahim Bozacı¹ , Ramazan Güngüneş² , Ertuğrul Çam³ 

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Keskin MYO, Pazarlama ve Reklamcılık Bölümü, 71400 Kırıkkale, TÜRKİYE

² Kırıkkale Üniversitesi, Keskin MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, 71400 Kırıkkale, TÜRKİYE

³ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 71100 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 30/03/2019

Kabul/Accepted: 27/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Tüketiciler için önemli bir kalite ve kullanılabilirlik unsuru olan akıllı telefon bataryaları ve batarya bitmesinin neden olduğu sorunlar, son zamanlarda araştırmacıların ilgisini çeken konulardandır. Bu çalışmada, bataryanın şarj ihtiyacı karşısında yaşanan olumsuz duygu ve şarj bitme kaygısının, akıllı telefon kullanıcılarının mobil uygulama enerji tüketim beklentilerine etkisi incelenmektedir. Bu kapsamda Kırıkkale ilinde kolayda örnekleme yöntemiyle 312 akıllı telefon kullanıcılarından birincil veriler toplanmış ve istatistiksel analiz yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Buna göre katılımcıların % 31,4'ünün mobil uygulamaların enerji tüketimiyle ilgili beklentileri yüksek olup, % 33,9'u şarj ihtiyacı hissettiğinde olumsuz duygular yaşamakta ve % 48,8'i şarj bitme kaygısı hissetmektedir. Bunların yanında şarj bitme kaygısı ve şarj ihtiyacı olduğunda yaşanan olumsuz duyguların, mobil uygulama enerji tüketim beklentilerini etkileyen faktörler olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla mobil uygulama tasarımında, enerji tüketim özelliklerinin göz önünde bulundurulması gereken önemli bir faktör olduğu sonucuna varılmaktadır.

Anahtar Kelimeler

“Enerji Tüketimi, Batarya, Şarj Bitme Kaygısı, Olumsuz Duygu, Mobil Uygulama”

Abstract

Smartphone batteries, which are an important element of quality and usability for consumers, and the problems caused by battery discharge have recently taken attention of researchers. In this research, effect of experienced negative emotions in the face of the need to charge, and anxiety about the discharge of the battery, on the energy consumption expectations of smartphone users are examined. In this context, primary data were collected from 312 smartphone users by convenience sampling method in Kırıkkale province and evaluated with statistical analysis method. As a result of the research, 31,4 % of the participants have high expectation about energy consumption of mobile applications, 33,9 % have negative emotions when they feel the need to charge and % 48,8 feel worry about running out of charge. In addition to this, it is determined that the anxiety about the discharge and the negative emotions when there is need for charging are the factors affecting the energy consumption expectations of mobile applications. Therefore, it is concluded that energy consumption features are important factor in mobile application design.

Key Words

“Energy consumption, Battery, Charging Discharge Anxiety, Negative Emotion, Mobile Application.”

1. Akıllı Telefon Bağımlılığı, Nomofobi ve Şarj Etme Davranışı

Akıllı telefonların; mesajlaşma, internette gezinme, sosyal medya iletişimi kurma, gündemi takip etme, işle ilgili sorumlulukları yerine getirme ve eğlenme gibi amaçlar için kolayca ve her yerde kullanılabilmesi, yaygınlaşmasını sağlamakta, insanlar tarafından ihtiyaç olarak değerlendirilmesine ve günde saatlerce zamanın akıllı telefonlara harcanmasına neden olmaktadır. Bu ihtiyacı karşılayamamaktan veya telefonda yoksun kalmaktan korkma, bireyde aşırı düzeyde olduğunda nomofobi adlı psikolojik bir rahatsızlık halini almaktadır (Kuss & Griffiths, 2011). Bir tür davranışsal bağımlılık türü olan nomofobi, öğrencilerde yaygınlıkla karşılaşılmakta ve bunu engellemede öğrencilere yönelik farkındalık kampanyaları geliştirilmesi önerilmektedir (Mathew vd., 2013).

Akıllı telefon bağımlılığının çekilme belirtisi boyutu olarak da ifade edilen bu durum; akıllı telefonun uyarı olmadan sürekli kontrol edilmesi, yoksun kalınmasından endişe, depresyon, titreme, kan basıncında artış, yalnızlık hissi, kalp atışında artış, günde 7 saatten fazla kullanılma, asosyallığe rağmen akıllı telefonun kullanılmasının tercih edilmesi, yedek batarya veya şarj etme davranışı ile yoksun kalmadan kaçınma, olumsuz ruh halini rahatlatmak için akıllı telefonu kullanma, sınıfta, banyoda, uyku öncesi ve araba sürerken kullanma gibi durumlarda bağımlılık haline dönüşebilmektedir (Tran, 2016). Türkiye’de 537 üniversite öğrencisi ile gerçekleştirilen bir araştırmada katılımcıların % 42,6’sında nomofobik olduğu tespit edilmiştir (Yıldırım vd., 2016). Bangalore’da Pavithra vd.’nin (2015) sağlık öğrencileri ile gerçekleştirdiği araştırmada; öğrencilerin % 39,5’inin nomofobik olduğu ve % 23’ünün etrafında cep telefonu olmadığında konsantrasyonunu kaybettiklerini ve stresli hissettikleri sonucuna varılmıştır (Pavithra vd., 2015).

Bu patolojik durum, sosyal izolasyon, ekonomik sorunlar, fiziksel ve psikolojik patolojilere (radyasyona maruz kalma, araba kazaları, yeni teknolojik ürünleri kullanamama endişesi vb.) neden olmaktadır (Beranuv vd., 2009). Nomofobinin önemli bir kaynağının cep telefonu veya akıllı telefonun şarjının bitmesi olduğu düşünülmektedir. Çünkü cep telefonu ile iletişim kuramama korkusu, cep telefonunu kaybetme veya cep telefonunun bozulması gibi durumlardan önce, sürekli, yaygınlıkla ve daha sık yaşanan bir durum olarak cep telefonunun şarjının bitmesiyle ilgilidir.

Finlandiya’da gerçekleştirilen bir araştırmada; akıllı telefon kullanıcılarının % 31’inin yapabildikleri sürece telefonu tekrar şarj ettiği, haftalık veya günlük tekrar şarj etme sorunu yaşayanların oranının % 19 olduğu tespit edilmiştir (Heikkinen & Nurminen, 2010). Oliver’in (2010) 17.300 akıllı telefon (BlackBery) kullanıcılarını “fırsatçı şarj edenler”, “hafif tüketiciler” ve “gece şarj edenler” olarak sınıflandırdığı çalışmasında; fırsatçı şarj edenler toplamın % 63’ünü oluşturmakta ve sık sık ve kısa süreli olarak şarj etmektedir. Hafif kullanıcılar ise toplamın % 20’sini oluşturmakta ve fırsatçılara göre daha uzun süre şarj etmekte ve daha uzun sürede şarjı bitirmektedir. Gece şarj edenler ise toplamın % 17’sini oluşturmakta, ortalama şarj süresi diğerlerine göre uzun sürmektedir. Dolayısıyla akıllı telefon kullanıcılarının şarj etme davranışlarına göre sınıflandırılmasının mümkün olduğu anlaşılmaktadır.

2. Şarj Bitme Kaygısı, Olumsuz Duygular ve Mobil Uygulama Enerji Tüketim Beklentileri

Akıllı telefonların işlem kapasitesindeki artış hızı, batarya süresi bakımından görülmemekte ve özellikle akıllı telefonun dört ay kullanımından sonra bataryaların dayanma süreleri kısalmaktadır. Dolayısıyla batarya süresi, cep telefonu kullanıcıları için önemli bir endişe kaynağıdır (Rahmati & Zhong, 2009). Dhir vd.’nin (2012) nitel araştırmasında insanların; batarya süresini öngöremedikleri, batarya bittiğinde yaşlılar haricindekilerin kendilerini sıkılgan ve sınırlı hissettiği, yaşlı insanların bataryayla ilgili daha az endişelendiği, pek çok telefon çağrısı aldıklarından bataryayı sürekli dolu tutmak istedikleri ve kullanıcıların bataryanın bitmesinden korktukları gibi sonuçlara varmıştır (Dhir vd., 2012).

Tam şarj olmuş bir akıllı telefon bataryası sürekli kullanıldığında genellikle bir gün yetmemekte ve insanlar cihazlarını sık sık şarj etmek zorunda kalmaktadır. Bu sorunu çözmede; kablosuz şarj noktaları oluşturma (Xu vd., 2017), enerji verimli cihazlar ve uygulamalar geliştirme (Heikkinen vd., 2012) gibi teknik ve mühendislikle ilgili çözümler geliştirmekte ve kullanıcılar da bataryalarının kısıtlı dayanma sürelerine karşı sessiz kalmamaktadır. Bir tahmine göre insanların % 80’i bataryalarının kullanma süresini uzatmak için önlemler almaktadır. Rahmati ve Zhong’un (2009) bu süreci insan batarya etkileşimi şeklinde tanımladığı çalışmalarında; batarya şarj düzeyi göstergelerinin yanında, kullanıcıların batarya tasarruf ayarlaması yapabildiği ara yüzlerin bu etkileşimde rol oynadığını ifade etmiştir. Ayrıca, kullanıcılar düşen batarya düzeyi karşısında kullanma kalıplarını değiştirmekte veya tekrar şarj edebilmektedir (Rahmati & Zhong, 2009). Dolayısıyla şarjın bitmesi, bundan kaynaklı endişe ve bittiğinde yaşanan olumsuz duygular, akıllı telefon kullanıcılarının davranışlarını etkilemektedir.

“Bataryam ne zaman bitti?” gibi sorular pek çok akıllı telefon kullanıcısı için önemli bir endişe ve sinir kaynağıdır. Akıllı telefon uygulamalarının karmaşıklığının ve sistem ayarlarının bunu etkilemesi, batarya kullanımını zorlaştırmaktadır. İşlemci aktivitesi ve ekran parlaklığı gibi değişkenlerin yanında, wi-fi sinyalindeki bir düşüş bir azalma % 13, akıllı telefonun gün ışığında kalması batarya süresini % 50 azaltabilmektedir (Peltonen vd., 2016). Azalan batarya karşısında insanların geleneksel şarj cihazı, mobil güç kaynağı veya güneş enerjili şarj cihazlarını yanında taşıması mümkündür. Ancak bunlar karmaşıklık yaratır ve belirli düzeyde bütçe gerektirir (Jain vd., 2018). Dolayısıyla akıllı telefon kullanıcıları, cihazlarının özellik ve işlevlerini bataryanın daha uzun süre kullanılmasını sağlayacak şekilde tasarlayabilmekte ve kesinti yaşamamak için gereksiz parlaklığı azaltma, müzik dinlememe gibi davranışlar gösterebilmektedir (Horta vd., 2016). Bunların yanında akıllı telefon kullanıcılarının mobil uygulama tercihlerinin, daha uzun süre batarya kullanma amacına ulaşma doğrultusunda gerçekleştirilmesi mümkündür ve mobil uygulamaların cihazın enerji tüketimine etkileri bakımından beklentilerinin işletmeler için önemli bir faktör olması söz konusudur.

3. Mobil Uygulamaların Enerji Tüketimine Etkisi ve Enerji Tüketim Beklentileri

Akıllı telefon kullanıcılarının en büyük sorunlarından biri şüphesiz bataryanın çabuk bitiyor olmasıdır. Çoğu telefonun şarj süresi bir gün bile gitmemektedir. Bataryaların hızlı bir şekilde bitmelerinin nedenlerinin başında, telefonlara yüklenen uygulamaların sayısı ve işlevleri olduğu görülebilmektedir. Özellikle sosyal medya uygulamaları direk olarak internet bağlantılı çalıştılarından akıllı telefonlarda hem işlevsel olarak enerji harcamakta hem de internete bağlantı yapmak için güç harcamakta ve bataryanın sürekli enerji tüketmesine sebep olmaktadır. Aynı zamanda mobil uygulamalar, aktif olarak kullanılsa bile bildirim özellikleri aktif olduğunda çalışmalarına arka planda devam etmektedirler. Dolayısı ile aktif olarak kullanılsa da sürekli internet bağlantısı gerekliliğinden dolayı sürekli bir güç harcama gereksinimi duymaktadır. Sosyal medya uygulamalarının yanı sıra web tarayıcı olarak kullanılan arama uygulamaları, virüs temizleme araçları, son zamanlarda popülerliği artan film izleme uygulamaları, e-posta uygulamaları, sohbet uygulamaları, bankacılık uygulamaları, oyun ve harita uygulamaları da bataryanın hızlı bir şekilde tükenmesine sebep olan mobil uygulamalar arasında yer almaktadır. Bunların yanında pek çok uygulama ekran performansını son derece etkili bir şekilde kullanmaktadır. Ekran parlaklığının artması ve çoğu ekran teknolojisinde renkli görsellerin ve hareketli figürlerin sürekli olarak değişmesi de batarya performansını doğrudan etkilemektedir. Örnekleri verilen çoğu uygulama günümüzde neredeyse tüm akıllı telefonlarda yüklenmiş ve hali hazırda kullanılmaktadır. Dolayısı ile telefon bataryalarının çok kısa bir sürede tükenmesi söz konusudur. Dolaşımdayken wifi ve bluetooth gibi araçların kapatılması, e-posta bildirim sürelerinin uzatılması, gereğinden fazla ekran parlaklığının düşürülmesi, virüs temizleme gibi programların gereksiz yere yüklenmemesi, mobil uygulama tercih ederken enerji tüketimine olan etkisinin incelenmesi gibi önlemler batarya sürelerinin uzatılması için bir yöntem olarak görünmektedir. Ancak bu noktada, tüketicilerin mobil uygulama tercihlerinde bunları göz önünde bulundurmasının, batarya bitme endişesi ve batarya bittiğinde yaşanan olumsuz duygularla ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Heikkinen ve Nurminen (2010) Finlandiya’lı üniversite öğrencileri üzerinde gerçekleştirdiği araştırmalarında; batarya tüketiminin mobil uygulamayı seçerken önemli bir faktör olduğu görülmüştür. Örneğin araştırmaya katılanlar büyük oranda; kullandıkları uygulama ve hizmetlerin telefonun güç tüketimini nasıl etkilediğini görmek, hangi mobil uygulama ve hizmetlerin en fazla enerji tükettiğini bilmek istemekte ve kullandıkları mobil uygulamanın enerji tüketimine etkisini uygulamayı kullanma davranışını etkileyeceğini belirtmektedir. Dolayısıyla tüketicilerin mobil uygulamaların enerji tüketimine olan etkilerine yönelik beklentilerin, mobil uygulamaların tasarlanmasında kullanılabileceği düşünülmektedir. Heikkinen vd.’nin (2012) araştırması da mobil cihaz kullanıcılarının; batarya durumu ve enerji tüketimiyle ilgili daha açık ve detaylı bilgiye ihtiyacı olduğunu, farklı uygulamaların enerji tüketimini nasıl etkilediğini bilmek ve enerji tüketimini kontrol etmeyi öğrenmek istediklerini göstermektedir.

4. Araştırmanın Amacı ve Yöntemi

Bu araştırmanın amacı akıllı telefon kullanıcılarının mobil uygulama enerji tüketim beklentilerine şarj bitme kaygısı ve şarj ihtiyacıyla ilgili olumsuz duyguların etkisini test etmektir. Bu doğrultuda, Kırıkkale ilinde kolayda örnekleme yöntemiyle 312 akıllı telefon kullanıcısından birincil veri toplanmıştır. Soru formunun oluşturulmasında konuyla ilgili bilimsel araştırmalardan yararlanılmıştır. Katılımcıların şarj bitme kaygısı ve mobil uygulamalarla ilgili enerji tüketim beklentilerini belirlemek üzere Heikkinen & Nurminen (2010), Yıldırım ve arkadaşları (2016) ve Heikkinen ve arkadaşlarının araştırmalarından yararlanılmıştır. Şarj ihtiyacı hissedildiğinde yaşanan olumsuz duyguları tespit etmek üzere Allen ve Chris’in (1989) ve Roehm ve Roehm’in (2005) araştırmasındaki ifadelerden yararlanılmıştır. Ayrıca katılımcılara akıllı telefonlarının bataryası hangi düzeydeyken şarj etmek ihtiyacı hissettikleri, ortalama batarya hangi düzeydeyken şarj ettikleri, akıllı telefonu hangi sıklıkta şarj ettikleri, kullandıkları akıllı telefon markaları ve demografik özelliklerine ilişkin sorular yöneltilmiştir.

4.1. Araştırmaya Katılanların Demografik Özellikleri

Araştırmaya katılanların özellikleri incelendiğinde % 46,8'inin kadın, % 53,2'sinin erkek olduğu görülmektedir. Eğitim bakımından katılımcıların % 50,7'si lise ve altı eğitim düzeyine sahip olan % 36,1'i yüksek okul mezunudur. Gelir bakımından ise katılımcıların % 46,7'si 2100 TL ve altı, % 30,8'i 2101-3600 TL arası gelire sahiptir. Çalışma durumu bakımından ise katılımcıların % 22,2'si ticaret, % 21,2'si memurluk ve % 42,7'si emekli&diğer grubunda yer almaktadır.

Tablo 1. Araştırmaya Katılanların Özellikleri

	Miktar	Geçerli Yüzde	Birikimli Yüzde
Cinsiyet			
Kadın	141	46,8	46,8
Erkek	160	53,2	100,0
Eğitim			
İlkokul	38	12,8	12,8
Lise	112	37,8	50,7
Yüksekokul	107	36,1	86,8
Lisan ve üstü	39	13,2	100,0
Gelir			
0-2.100 TL	137	46,9	46,9
2101-3.600 TL	90	30,8	77,7
3.601 TL ve üstü	65	22,3	100,0
Çalışma durumu			
ticaret/serbest	67	22,2	22,2
ücretli/memur	64	21,2	43,4
ücretli/işçi	42	13,9	57,3
Emekli&diğer	129	42,7	100,0

Araştırmaya katılanların en fazla kullandığı akıllı telefon markası % 44,7'lik (138 kişi) oranla Samsung olup, bunu % 27,9 (87 kişi) ile iPhone takip etmektedir. Bunların yanında %27,4'lük bir oran içerisinde Huawei, LG, Casper, Vestel, Sony gibi markalar bulunmaktadır.

Ayrıca katılımcıların büyük oranda şarj etme ihtiyacı hissettikleri batarya doluluk düzeyi % 0-20 olup, bu grubun oranı % 58,9'dur. Ayrıca katılımcıların % 12,7'si bataryalarını % 41-60 arasındayken şarj etme ihtiyacı hissetmektedir. Bataryaları şarj etme düzeyi bakımından ise katılımcıların % 55,5'i % 0-20 arasında şarj ederken, % 31,4'ü % 21-40 doluluk oranındayken ve % 13,1'i % 41-60 doluluk düzeyinde şarj etmektedir.

Tablo 2. Kullanılan Akıllı Telefon Markası ve Şarj Etme Durumları

Kullanılan akıllı telefon markası	Miktar	Geçerli Yüzde	Birikimli Yüzde
Samsung	138	44,5	44,5
iPhone	87	28,1	72,6
Diğer	85	27,4	100,0
Total	310	100,0	
Şarj etme ihtiyacı hissetme düzeyi (batarya doluluk oranı)			
% 0-20	172	58,9	58,9
% 21-40	83	28,4	87,3
% 41-60	37	12,7	100,0
Toplam	292	100,0	
Şarj etme düzeyi (batarya doluluk oranı)			
% 0-20	161	55,5	55,5
% 21-40	91	31,4	86,9
% 41-60	38	13,1	100,0
Toplam	290	100,0	

Araştırmaya katılanların akıllı telefon bataryasının bitme kaygısı ve bittiğinde yaşanan olumsuz duyguları belirlemek üzere gerçekleştirilen faktör analizine göre KMO katsayısı 0,900 ve Bartlett değeri anlamlı olarak tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre toplam varyansın % 76,857'sini açıklayan iki faktör tespit edilmiştir.

Tablo 3. Faktör Analizi I

1. Faktör: Şarj İhtiyacı Olduğunda Olumsuz Duygu		Yükler
Mutsuz hissederim		,902
Sinirli hissederim		,871
Üzüntülü hissederim		,819
Kötü hissederim		,808
Olumsuz hissederim		,711
Özdeğer: 5,635, Açıklanan Varyans: 62,615, Toplam Varyans: 62,615 Alfa: 0,923, Ortalama: 3,0123		
2. Faktör: Şarj bitme kaygısı		
İşlerimin olduğu bir günde akıllı telefonunun bataryasının bitmesi benim için bir felaket gibidir		,868
Akıllı telefonumun bataryasının bir anda/farkında olmadan bitmesini asla istemem		,847
Akıllı telefonumun şarjını sürekli kontrol ederim		,812
Akıllı telefonumun şarjının bitmesinden korkarım		,740
Özdeğer: 1,282, Açıklanan Varyans: 14,242, Toplam Varyans: 76,857, Alfa: 0,894, Ortalama: 3,5561		

Araştırma kapsamında akıllı telefonda mobil uygulamaların enerji tüketimin beklentilerine yönelik hazırlanan ifadeler faktör analizine tabi tutulmuştur. Buna göre oluşturulan ifadeler toplam varyansın % 73,292'sini açıklayan tek faktör altında toplanmıştır.

Tablo 4. Faktör Analizi II

Mobil Uygulama Enerji Tüketim Beklentileri		Yükler
Bir mobil uygulamanın batarya tüketimi, o uygulamayı kullanma düzeyimi etkiler		,906
Belirli bir mobil uygulamanın bataryanın bitmesine etkisini bilmek isterim		,887
En fazla bataryayı tüketen mobil uygulamaları bilmek isterim		,881
Akıllı telefonda yeni bir uygulama kullanacağım zaman bataryaya etkisini öncelikle düşünürüm		,830
Mevcut durumda kullandığım mobil uygulamaların enerji tüketimini bilmek isterim		,823
Bataryam azaldığında enerji tüketen uygulamaların otomatik olarak kapanmasını isterim		,803
Özdeğer: 4,398, Açıklanan Varyans: 73,292, Toplam Varyans: 73,292, Alfa: 0,927, Ortalama: 3,1554		

Faktör analizi neticesinde belirlenen değişken ortalamalarının normal dağılıma uygunluğunu belirlemek üzere basıklık (kurtosis) ve çarpıklık (çarpıklık) değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerin -1,5 ile + 1,5 arasında olması durumunda verilen normal dağılımının varsayılması mümkündür (Tabachnik ve Fidell, 2013). Buna göre basıklık değerleri; olumsuz duygu için -1,245, şarj bitme kaygısı için -0,367 ve mobil uygulama enerji tüketim beklentileri için -0,808, çarpıklık değerleri ise; olumsuz duygu için -0,58, şarj bitme kaygısı için -0,713 ve mobil uygulama enerji tüketim beklentileri değişkeni için -0,351'dir. Bu değerler göz önünde bulundurularak değişkenleri ölçen verilerin normal dağıldığı varsayılmıştır. Buna göre; farklılıkların analizinde parametrik analiz yöntemleri (iki grup için: bağımsız örneklem t-tesisi, ikiden fazla grup için: anova) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca araştırma kapsamında, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini incelemek üzere regresyon analizi gerçekleştirilmiştir.

4.2. Araştırma Değişkenlerine Yönelik Frekans Analizi

Katılımcıların şarj ihtiyacı olduğunda yaşanan olumsuz duygu, şarj bitme kaygısı ve mobil uygulama enerji tüketim beklentileri bakımından yüksek (yanıt ortalaması 4 ve üstü olanlar), orta (yanıt ortalaması 2 ile 4 arasında olanlar) ve düşük (yanıt ortalaması 2 ve altı olanlar) düzeyde olanlara yönelik gerçekleştirilen sıklık analizine göre; katılımcıların % 33,9'u şarj ihtiyacı olduğunda olumsuz duygular ve % 48,8'i şarj bitme kaygısı yaşamaktadır. Mobil uygulama enerji tüketim beklentileriyle ilgili ifadeler katılımcıların % 31,4'unun en azından katılma düzeyinde yanıt verdiği tespit edilmektedir.

Tablo 5. Frekans Analizi

	Miktar	Geçerli Yüzde	Birikimli Yüzde
Şarj İhtiyacı Olduğunda Olumsuz Duygular			
Düşük	94	30,3	30,3
Orta	111	35,8	66,1
Yüksek	105	33,9	100,0
Şarj bitme kaygısı			
Düşük	43	13,8	13,8
Orta	120	38,5	52,2
Yüksek	149	48,8	100
Mobil Uygulama Enerji Tüketim Beklentileri			
Düşük	63	20,2	20,2
Orta	151	48,4	68,6
Yüksek	98	31,4	100

4.3. Farklılıkların İncelenmesi

Cinsiyete göre araştırma değişkenleri arasındaki farklılıklar incelendiğinde, şarj ihtiyacı olduğunda olumsuz duygu ve şarj bitme kaygısının cinsiyete göre farklılaşmadığı görülmektedir. Diğer taraftan mobil uygulama enerji tüketim beklentilerinin erkeklerde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6. Cinsiyete Göre Farklılıklar

	cinsiyet	N	Ortalama	Sig.
Şarj İhtiyacı Olduğunda Olumsuz Duygu	Kadın	139	3,1223	0,269
	Erkek	160	2,9600	
Şarj bitme kaygısı	Kadın	141	3,6223	0,407
	Erkek	160	3,5156	
Mobil Uygulama Enerji Tüketim Beklentileri	Kadın	141	3,0118	0,023
	Erkek	160	3,3000	

Yaşa göre araştırma değişkenleri arasındaki farklılıklar incelendiğinde; 27 yaş altında olanların şarj ihtiyacı olduğunda olumsuz duygu ve şarj bitme kaygısı bakımından diğer yaş gruplarından daha yüksek ortalamalara sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca mobil uygulama enerji tüketim beklentileri bakımından 27 yaş altında olanların, diğer gruplardan 44 ve üstü yaş grubunda olanlara göre anlamlı düzeyde daha yüksek ortalamaya sahip olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 7. Yaşa Göre Farklılıklar

	Yaş	N	Ortalama	Sig.
Şarj İhtiyacı Olduğunda Olumsuz Duygu	27 ve altı	138	3,3449	0,000
	28-35	56	3,2000	
	36-43	60	2,7167	
	44 ve üstü	54	2,2222	
Şarj bitme kaygısı	27 ve altı	138	3,7953	0,000
	28-35	58	3,6638	
	36-43	60	3,3042	
	44 ve üstü	54	3,0648	
Mobil Uygulama Enerji Tüketim Beklentileri	27 ve altı	138	3,3865	0,000
	28-35	58	3,1667	
	36-43	60	3,1694	
	44 ve üstü	54	2,4691	

Gelire göre farklılıklar incelendiğinde, şarj ihtiyacı olduğunda olumsuz duygu bakımından anlamlı farklılıklar görülmemiştir. Şarj bitme kaygısı bakımından ise 3.601 TL ve üzeri gelire sahip olanların, 2.101-3.600 TL gelir aralığında olanlara göre daha yüksek ortalamaya sahip olduğu anlaşılmıştır. Son olarak mobil uygulama enerji tüketim beklentilerinin, 3.601 TL ve üstü ve 2.101-3.600 TL gelir aralığında olanlarda, 2.100 TL altı gelire sahip olanlara göre anlamlı düzeyde yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 8. Gelire Göre Farklılıklar

	Gelir	N	Ortalama	Sig.
Şarj İhtiyacı Olduğunda Olumsuz Duygu	2100 TL ve altı	137	3,0745	0,580
	2101-3600 TL	90	2,9311	
	3601 TL ve üstü	63	2,9016	
Şarj bitme kaygısı	2100 TL ve altı	137	3,5730	0,005
	2101-3600 TL	90	3,2611	
	3601 TL ve üstü	65	3,8538	
Mobil Uygulama Enerji Tüketim Beklentileri	2100 TL ve altı	137	2,8564	0,001
	2101-3600 TL	90	3,2574	
	3601 TL ve üstü	65	3,4462	

Çalışma durumuna göre farklılıklar incelendiğinde, şarj ihtiyacı olduğunda olumsuz duygu bakımından anlamlı farklılık görülmemiştir. Şarj bitme kaygısı bakımından, ücretli/memur grubunda yer alanların, ücretli/işçi ve emekli/diğer grubunda yer alanlara göre anlamlı düzeyde daha yüksek ortalamaya sahip olduğu tespit edilmiştir. Mobil uygulama enerji tüketim beklentileri bakımından ise ücretli/memur grubunda yer alanların, ticaret/serbest ve emekli/diğer grubunda yer alanlara göre anlamlı düzeyde yüksek ortalamaya sahip olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 9. Çalışma Durumuna Göre Farklılıklar

	Çalışma durumu	N	Ortalama	Sig.
Şarj İhtiyacı Olduğunda Olumsuz Duygu	ticaret/serbest	67	3,1433	0,119
	ücretli/memur	62	3,2774	
	ücretli/işçi	42	2,8857	
	Emekli&diğer	129	2,8527	
Şarj bitme kaygısı	ticaret/serbest	67	3,5336	0,009
	ücretli/memur	64	3,9297	
	ücretli/işçi	42	3,2262	
	Emekli&diğer	129	3,4748	
Mobil Uygulama Enerji Tüketim Beklentileri	ticaret/serbest	67	3,1169	0,000
	ücretli/memur	64	3,6927	
	ücretli/işçi	42	3,2222	
	Emekli&diğer	129	2,8217	

Araştırma değişkenleri arasındaki ilişkileri incelemek üzere gerçekleştirilen korelasyon analizi sonuçlarına göre; mobil uygulama enerji tüketim beklentilerinin şarj ihtiyacı olduğunda olumsuz duygu ve şarj bitme kaygısının mobil uygulama enerji tüketim beklentileriyle pozitif yönde ve anlamlı ilişkilere sahip olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 10. Korelasyon Analizi

	Mobil Uygulama Enerji Tüketim Beklentileri
Şarj İhtiyacı Olduğunda Olumsuz Duygu	,499**
	,000
Şarj bitme kaygısı	,604**
	,000

Şarj ihtiyacı olduğunda olumsuz duygu, şarj bitme kaygısı ve demografik faktörlerin, mobil uygulama enerji tüketim beklentilerini açıklama oranını belirlemek üzere gerçekleştirilen regresyon analizine göre; araştırma modeli anlamlı bulunmuştur. Buna göre bağımsız değişkenler mobil uygulama enerji tüketim beklentilerinin % 50'sini açıklamaktadır.

Tablo 11. Regresyon Analizi

Bağımlı Değişken: Mobil Uygulama Enerji Tüketim Beklentileri	T	Sig.
Sabit		2,714 0,007
	Standart B	
Şarj İhtiyacı Olduğunda Olumsuz Duygu	,159	2,729 ,007
Şarj bitme kaygısı	,421	7,409 ,000
Cinsiyet	,163	3,358 ,001
Yaş	-,262	-5,283 ,000
Gelir	,220	4,271 ,000
Meslek	-,070	-1,471 ,143
F: 49,993	R: 0,713	R ² : 0,498 0,000

5. Sonuç

Mobil uygulamalardan enerji tüketim beklentilerinde, akıllı telefon batarya bitme endişesi ve batarya bittiğinde yaşanan olumsuz duyguların etkisini incelemek üzere gerçekleştirilen bu çalışmada, araştırma bağımsız değişkenlerinin bağımlı değişkenin yaklaşık % 50'sini açıkladığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla mobil uygulamalardan enerji tüketim beklentileri yüksek olanların, şarj bitme kaygısını ve şarj ihtiyacı olduğunda olumsuz duyguları daha fazla yaşayanlar olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek düzeyde mobil uygulama enerji tüketim beklentisine sahip olanların oranının % 31,4 olması, bu tüketici grubunun göz ardı edilemeyen oranda olduğunu göstermektedir. Araştırmaya katılanların yaklaşık yarısının şarj bitme kaygısı yaşaması ise, bu durumun akıllı telefon kullanıcıları için önemli bir sorun olduğunu göstermektedir. Nitekim şarj bitme kaygısının ve şarj ihtiyacı olduğunda olumsuz duygular yaşamanın, mobil uygulama enerji tüketimini etkileyen faktörler olduğu sonucuna çalışmada varılmaktadır.

Referanslar

- Allen, C. T. & Janiszewski, C. A. (1989). Assessing the Role of Contingency Awareness in Attitudinal Conditioning with Implications for Advertising Research. *Journal of Marketing Research*, 26, 30-43.
- Beranuy M, Oberst U, Carbonell X, & Chamarro A. (2009). Problematic Internet and mobile phone use and clinical symptoms in college students: the role of emotional intelligence. *Computers in Human Behavior*, 25(5), 1182–1187.

- Dhir, A., Kaur, P., Jere, N., & Albidewi, I. A. (2012). Understanding mobile phone battery-human interaction for developing world a perspective of feature phone users in africa. In 2012 2nd Baltic Congress on Future Internet Communications, 127-134.
- Heikkinen, M. V., & Nurminen, J. K. (2010). Consumer attitudes towards energy consumption of mobile phones and services. 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference, 1-5.
- Heikkinen, M. V., Nurminen, J. K., Smura, T., & HäMmälnen, H. (2012). Energy efficiency of mobile handsets: Measuring user attitudes and behavior. *Telematics and Informatics*, 29(4), 387-399.
- Horta, A., Fonseca, S., Truninger, M., Nobre, N., & Correia, A. (2016). Mobile phones, batteries and power consumption: An analysis of social practices in Portugal. *Energy Research & Social Science*, 13, 15-23.
- Jain, N., Fan, X., Leon-Salas, W. D., & Lucietto, A. M. (2018). Extending battery life of smartphones by overcoming idle power consumption using ambient light energy harvesting. 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 978-983.
- Mathew, JB, B., P., Thulasi, P. C., & Philip, J. (2013). Nomophobia-do we really need to worry about?. *Reviews of Progress*, 1(1), 1-5.
- Kuss DJ, Griffiths M.D. (2011). Online social networking and addiction – a review of the psychological literature. *International journal of environmental public health*, 8(9), 3528–3552.
- Oliver, E. (2010). Diversity in smartphone energy consumption. In Proceedings of the 2010 ACM workshop on Wireless of the students, by the students, for the students, ACM, 25-28.
- Pavithra, M. B., Madhukumar, S., & Mahadeva, M. (2015). A study on nomophobia-mobile phone dependence, among students of a medical college in Bangalore. *National Journal of community medicine*, 6(3), 340-344.
- Peltonen, E., Lagerspetz, E., Nurmi, P., & Tarkoma, S. (2016). Constella: Crowdsourced system setting recommendations for mobile devices. *Pervasive and Mobile Computing*, 26, 71-90.
- Rahmati, A., & Zhong, L. (2009). Human–battery interaction on mobile phones. *Pervasive and Mobile Computing*, 5(5), 465-477.
- Roehm, Harper A. Jr. & Roehm, M. L. (2005). Revisiting the Effect of Positive Mood on Variety Seeking. *Journal of consumer research*, 32, 330-336.
- Tabachnick, B.G. & Fidell, L.S. (2013). *Using multivariate statistics*. Boston: Pearson.
- Tran, D. (2016). Classifying nomophobia as smart-phone addiction disorder. *UC Merced Undergraduate Research Journal*, 9(1), 1-22.
- Xu, W., Liang, W., Peng, J., Liu, Y., & Wang, Y. (2017). Maximizing charging satisfaction of smartphone users via wireless energy transfer. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 16(4), 990-1004.
- Yildirim, C., Sumuer, E., Adnan, M., & Yildirim, S. (2016). A growing fear: Prevalence of nomophobia among Turkish college students. *Information Development*, 32(5), 1322-1331.



Bakır ve Magnezyum Katkılarının Al-17Si Alaşımının Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkisi

Effect of Copper and Magnesium Additions on the Structural, Mechanical and Tribological Properties of the Al-17Si Alloy

Ali Paşa Hekimoğlu¹ , Murat Hacıosmanoğlu¹ 

¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 53100, Rize, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 29/03/2019

Kabul/Accepted: 18/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Al-17Si, Al-17Si-4Cu ve Al-17Si-4Cu-0,6Mg alaşımları kokil kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri spark optik emisyon spektrometresi yöntemi ile belirlenerek doğrulandı. İyapı incelemeleri standart metalografik yöntemlerle hazırlanan numuneler üzerinde ışık ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirildi. Alaşımların sertliği Brinell sertlik ölçme yöntemiyle, akma ve çekme dayanımı ile kopma uzaması değerleri ise universal bir test makinesinde yapılan çekme deneyleri ile belirlendi. Çekme deneylerine tabi tutulan numunelerin yüzeyleri ve yüzey altları SEM'de incelenerek görüntüldü. Alaşımların tribolojik özellikleri bilye disk esaslı bir deney düzeneği yardımıyla belirlendi. İkili Al-17Si alaşımının iyapısının alüminyumca zengin α , ötektik Al-Si, primer silisyum ve β fazlarından, üçlü Al-17Si-4Cu alaşımının Al-17Si alaşımındaki fazların yanı sıra bakırca zengin θ (CuAl_2) fazını da içerdiği görüldü. Dörtlü Al-17Si-4Cu-0,6Mg alaşımında ise Al-17Si-4Cu alaşımındaki fazlara ilave olarak Mg_2Si fazının oluştuğu ve ayrıca ikili ve üçlü alaşımda görülen β fazının dörtlü alaşımda π fazına dönüştüğü belirlendi. Bakır katkısı Al-17Si alaşımının sertlik, akma ve çekme dayanımı değerlerini sırasıyla % 59, 52 ve 20 artırdı. Magnezyum katkısı ise Al-17Si-4Cu alaşımının sertlik, akma ve çekme dayanımı değerlerini sırasıyla % 19, 2 ve 4 artırdı. Bakır ve magnezyum katkıları hacim kaybı değerlerinde ise sırasıyla %57 ve 3 azalmaya yol açtı. Mekanik ve tribolojik deneylerden elde edilen sonuçlar alaşımların yapısal özelliklerine dayandırılarak irdelendi.

Anahtar Kelimeler

"Al-17Si esaslı alaşımlar, İyapı, Mekanik özellikler, Aşınma, Kırılma"

Abstract

Al-17Si, Al-17Si-4Cu and Al-17Si-4Cu-0.6Mg alloys were produced by permanent mold casting method. Chemical composition of the produced alloys was confirmed by spark optical emission spectrometry method. Structural examinations of the alloys were carried out with optical and scanning electron microscopy (SEM) on the samples prepared by standard metallographic methods. The hardness of the alloys was determined by the Brinell hardness measurement method. The values of the elongation to fracture, yield and tensile strength of the alloys produced were determined by tensile tests performed with a universal testing machine. The fracture surfaces and the sub-surfaces of the tensile test samples were examined by SEM. Tribological characteristics of the alloys were investigated by a ball-on-disc type friction-wear test machine. It was observed that microstructure of the Al-17Si alloy consisted of the phases of aluminum-rich α , eutectic Al-Si, primary silicon and β . Ternary Al-17Si-4Cu alloy showed a microstructure consisting of the phase of θ (CuAl_2) in addition to phases observed in the Al-17Si alloy. Al-17Si-4Cu-0.6Mg alloy showed a microstructure consisting of Mg_2Si in the addition to the phases observed in the ternary alloy. In addition to this the β phase observed in the ternary alloy turned into π phase in the quaternary alloy. The copper addition increased the hardness, yield and tensile strength values of Al-17Si alloy by 59, 52 and 20, respectively. Magnesium addition increased the hardness, yield and tensile strength values of Al-17Si-4Cu alloy by 19, 2 and 4%, respectively. Copper and magnesium additions caused 57% and 3 decrease in volume loss values, respectively. The results obtained from mechanical and tribological tests were discussed on the basis of structural changes observed in the alloys due to copper and magnesium additions.

Key Words

"Al-17Si based alloys, Microstructure, Mechanical properties, Wear, Fracture"

1. Giriş

Otomotiv, uzay, havacılık ve savunma sanayi başta olmak üzere birçok sanayi dalında imalat maliyetlerinin azaltılıp, işgücü ve enerji verimliliğinin (yakıt ekonomisi) artırılması gün geçtikçe daha büyük önem taşımaktadır. Bu durum söz konusu sanayi dallarında kullanılmak üzere imalatı kolay, yeterli fiziksel ve mekanik özelliklerin yanı sıra üstün aşınma direncine sahip ancak daha hafif malzemelerin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu amaçla yapılan çalışmalar ergime noktası ve yoğunlukları düşük, özgül mukavemeti, aşınma ve korozyon direnci yüksek, daha kolay şekillendirilebilen malzemeler üzerine yoğunlaşmıştır (Miller vd., 2009, Medrano-Prieto vd., 2016, Kaba vd., 2018).

Dökümlerinin, işlenmelerinin ve şekillendirilmelerinin kolay olması, özgül mukavemetlerinin, korozyon, aşınma ve sıcak yırtılma dirençlerinin yüksek olması ve bu özelliklerinin yanı sıra ısıl genişleme katsayılarının düşük olması nedeniyle, alüminyum-silisyum (Al-Si) esaslı alaşımlar pek çok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Bu avantajlarından dolayı Al-Si alaşımlarının yukarıda belirtilen sanayi dallarında kullanılmalarına yönelik olarak yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları son yıllarda giderek artmıştır (Slattery vd., 2009, Hiromi & Wu, 2016, Kang vd., 2016). Bu çalışmalar kolay üretim, uygun mukavemet ve süneklik kombinasyonuna sahip oldukları için özellikle ötektik bileşime (~%12Si) yakın oranlarda (%5-17) silisyum içeren Al-Si esaslı alaşımlar üzerinde yoğunlaşmış ve hali hazırda ticarileşmiş olan pek çok Al-Si esaslı alaşım geliştirilmiştir (Kang vd., 2016, Di Giovanni vd., 2019, Kumar & Tewari, 2018). Geliştirilen Al-Si alaşımları özellikle motor blokları, pistonlar, silindir blokları, emme manifoldları, yağ karterleri, karbüratörler, şanzıman kutusu, transistor soğutucuları, veri kayıt diskleri, akümülatörler, roket gövdesi ve daha birçok farklı parçanın üretiminde başarıyla kullanılmaktadır (Davis, 2001, Miller vd., 2009, Jorstad & Apelian, 2009, Campbell, 2011). Yüksek mukavemet ve süneklik gerektiren uygulamalarda %12 den az silisyum içeren Al-Si alaşımları tercih edilirken, yüksek sertlik ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda %12 den daha fazla oranda silisyum içeren Al-Si alaşımları tercih edilmektedir (Fatahalla vd., 1999, Jorstad & Apelian, 2009, Channappagoudar vd., 2015, Tiwari vd., 2018, Qi vd., 2018). Al-Si esaslı alaşımların yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri içerdikleri alüminyum veya silisyum oranının yanı sıra diğer alaşım elementlerine ve bu elementlerin oranlarına bağlı olarak değişmektedir (Liv vd., 2017, Prabhudev vd., 2014, Lee vd., 2012).

Bakır (Cu) ve magnezyum (Mg) Al-Si alaşımlarında yaygın olarak kullanılan alaşım elementlerindedir. Motor veya silindir bloğu gibi yüksek sertlik ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda tercih edilen Al-17Si esaslı EN AC-48100 alaşımında da sırasıyla %4 ve %0,6 oranlarında bakır ve magnezyum bulunmaktadır. Bakır ve magnezyumun genel olarak bazı Al-Si alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirdiği bilinmesine rağmen bu katkıların %17 oranında silisyum içeren Al-17Si alaşımının yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisinin birlikte ve sistematik bir şekilde incelendiği bir çalışma henüz yapılmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada %4 ve %0,6 oranlarında bakır ve magnezyum katkısının Al-17Si alaşımının yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

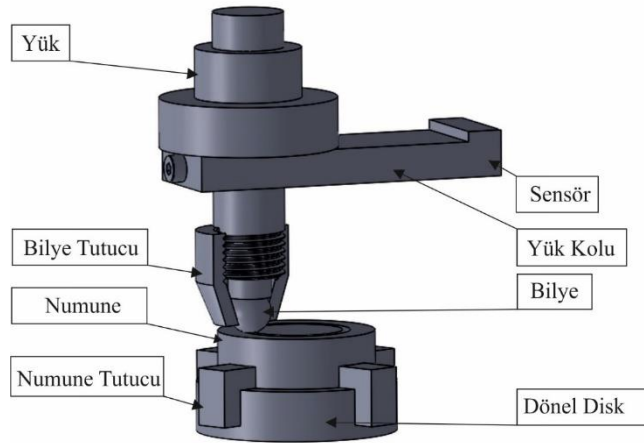
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada ötektik üstü bileşim esaslı birer adet ikili Al-17Si, üçlü Al-17Si-4Cu ve dördü Al-17Si-4Cu-0,6Mg alaşımı kokil kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Alaşımların üretiminde ticari saflıkta alüminyum, silisyum ve magnezyum ile Al-50Cu alaşımı kullanıldı. Ağırlıkça uygun kimyasal bileşimi sağlayacak şekilde hazırlanan alaşım elementleri orta frekanslı bir indüksiyon ocağında ergitildi. Ergimiş durumdaki alaşımlar yaklaşık olarak 770 °C döküm sıcaklığından SAE 8620 çeliğinden imal edilmiş bir çelik kalıba dökülerek katılaştırıldı. Üretilen külçelerinin kütlece kimyasal bileşimleri spark optik emisyon spektrometresi (Spark OES) yöntemi ile belirlenerek doğrulandı.

Üretilen alaşımların yapısal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi için dökümlerden elde edilen alaşım külçelerinden talaşlı işleme yöntemiyle uygun boyutlarda numuneler hazırlandı. Metalografi, yoğunluk ve sertlik ölçümleri için Ø15×10 mm, çekme deneyleri için Ø8×40 mm, sürtünme ve aşınma deneyleri için ise Ø22×7 mm boyutlarındaki numuneler kullanıldı. Metalografik incelemeler için numuneler 300 ve 2000 numaralar arasındaki çeşitli zımparalar ile taşlandıktan sonra parlatıldı. Parlatılan numuneler dağlanma işlemine tabi tutulmadan doğrudan hem ışık mikroskobu hem de taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelendi ve içyapılarını gösteren fotoğraflar çekildi. Alaşımların yoğunlukları Arşimet prensibi ile belirlendi. Bu yöntemde önce yoğunluğu ölçülecek numunenin kütlesi 0.01 mg hassasiyetinde bir terazi ile ölçüldü. Daha sonra numune içerisinde su olan dereceli bir silindir kabın içerisine daldırıldı. Batan cismin yer değiştirdiği su miktarı dereceli silindir üzerinden okunarak numunenin hacmi belirlendi. Numunelerin kütleleri ölçülen hacim değerlerine bölünerek yoğunlukları belirlendi.

Alaşımların sertliği Brinell sertlik ölçme yöntemiyle 62,5 kg×f yük altında 2,5 mm çapında bilye uç kullanılarak ölçüldü. Çekme deneyleri 10⁻³ s⁻¹ lik deformasyon hızında gerçekleştirildi ve bu deneyler sonucunda elde edilen değerlerin ortalaması alınarak alaşımların akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri belirlendi. Çekme deneylerine tabi tutulan numunelerin kırılma yüzeyleri ve yüzey altları SEM’de incelenerek görüntülendi. Alaşımların tribolojik özellikleri şematik resmi Şekil 1’de verilen ve ASTM: G99 standartlarına uygun olan bilye disk esaslı bir deney düzeneği yardımıyla belirlendi. Bu deney düzeneği 50-500 d/dk devirler arasında çalışabilen bir elektrik motoru, yüklem kolu, deney numunesinin yerleştirildiği bir disk, numune tutucu, aşındırıcı bilye, bilye tutucu, sıcaklık ve kuvvet algılayıcı sensörler ve bilgisayar destekli kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Aşındırıcı bilye yüklem koluna düşey olarak yataklanmış durumdaki bir tutucuya hareket ettirecek şekilde yerleştirilmektedir. Deneylerde 6 mm çapında ve 58-62 RSD sertlik değerine sahip 100Cr6 çeliğinden imal edilmiş bir bilye kullanıldı. Deney düzeneğinde yüklem, yüklem kolunun ucuna ağırlık asmak suretiyle gerçekleştirilmektedir. Sürtünme kuvveti 30 N kapasiteli bir indüktif sensör ile belirlendi. Bu sensörden alınan veriler bilgisayardaki yazılım tarafından işlenerek sürtünme kuvveti belirlenmekte ve belirlenen sürtünme kuvveti uygulanan normal yüke bölünerek sürtünme katsayısı hesaplanmaktadır.

Sürtünme katsayısının zamana göre değişimi program aracılığıyla deney boyunca sürekli kaydedilmiştir. Hacim kaybı değerleri ise numunelerin deney öncesi ve sonrasındaki kütlelerinin farkının yoğunluk değerlerine bölünmesi ile hesaplandı. Sürtünme-aşınma deneylerinden sonra aşınma örneklerinin aşınma yüzeyleri SEM’de incelenerek aşınma yüzey karakteristikleri belirlendi.



Şekil 1. Sürtünme aşınma deney düzeneğinin şematik resmi

3. Bulgular

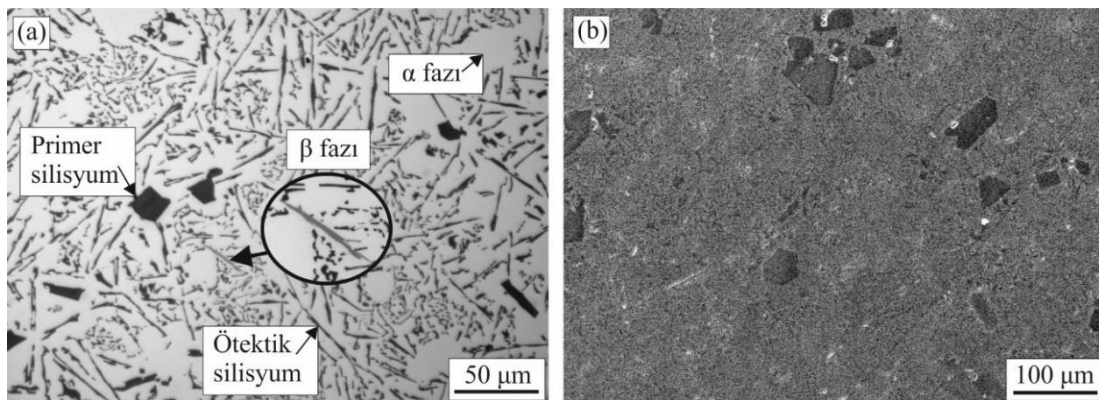
Üretilen alaşımların kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Alaşımların Kimyasal Bileşimleri

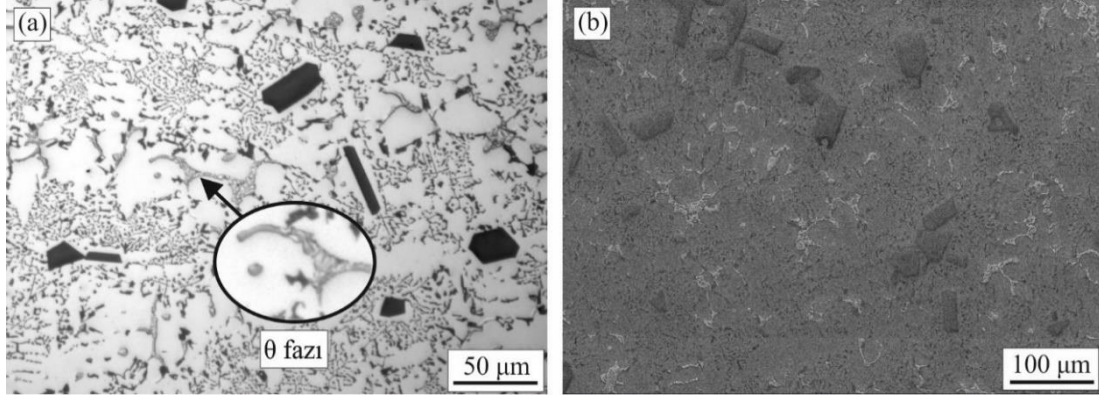
Alaşım	Kimyasal Bileşim Oranı (% ağırlık)				
	Al	Si	Cu	Mg	Diğer (Fe, Mn, Ni, Sn)
Al-17Si	Kalan	17,3	---	---	0,20
Al-17Si-4Cu	Kalan	16,7	3,9	---	0,20
Al-17Si-4Cu-0.6Mg	Kalan	16,8	4,2	0,64	0,20

Al-17Si, Al-17Si-4Cu ve Al-17Si-4Cu-0.6Mg alaşımlarının içyapısını gösteren optik mikroskop ve SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 2, 3 ve 4’de verilmiştir. Al-17Si alaşımının içyapısının alüminyumca zengin α , ötektik Al-Si, primer silisyum ve β fazlarından oluştuğu görülmüştür. Ötektik silisyum parçacıklarının ince ve uzun, primer silisyum parçacıklarının ise değişik geometrilere iri ve köşeli bir yapıda oldukları görülmektedir.

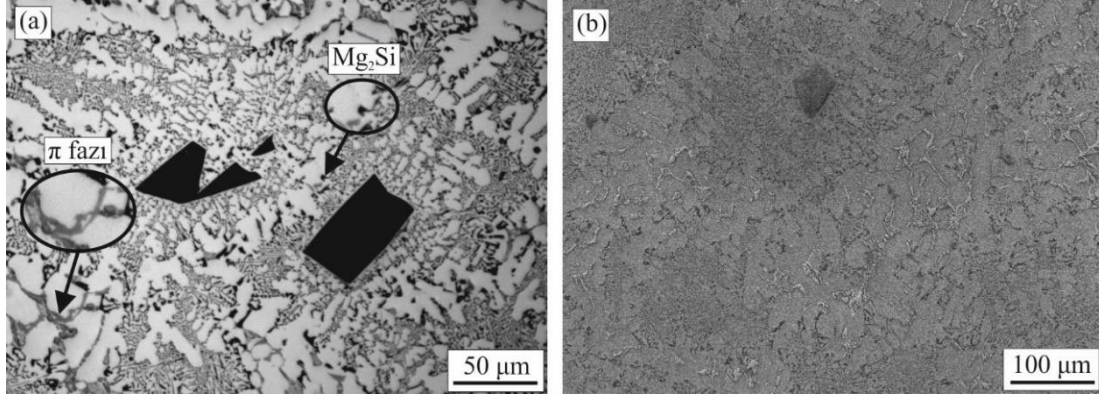
Al-17Si alaşımına %4 oranında bakır katılması durumunda içyapıdaki alüminyumca zengin α fazının belirgin bir dendiritik şekil aldığı, ötektik silisyum parçacıklarının incelendiği ve dendiritler arası bölgelerde bakırca zengin θ (CuAl_2) fazının oluştuğu gözlemlendi. Al-17Si-4Cu-0,6Mg alaşımının metalografik yapısının genel olarak Al-17Si-4Cu alaşımınıninkinden çok farklı olmadığı, ancak magnezyum katkısıyla α dendiritleri ile ötektik faz arasındaki sınırlarda Mg_2Si bileşiğinin oluştuğu ve β fazının π fazına dönüştüğü belirlendi.



Şekil 2. Al-17Si alaşımının içyapısının (a) optik mikroskop görüntüsü (b) SEM görüntüsü



Şekil 3. Al-17Si-4Cu alaşımlarının iç yapısının (a) optik mikroskop görüntüsü (b) SEM görüntüsü



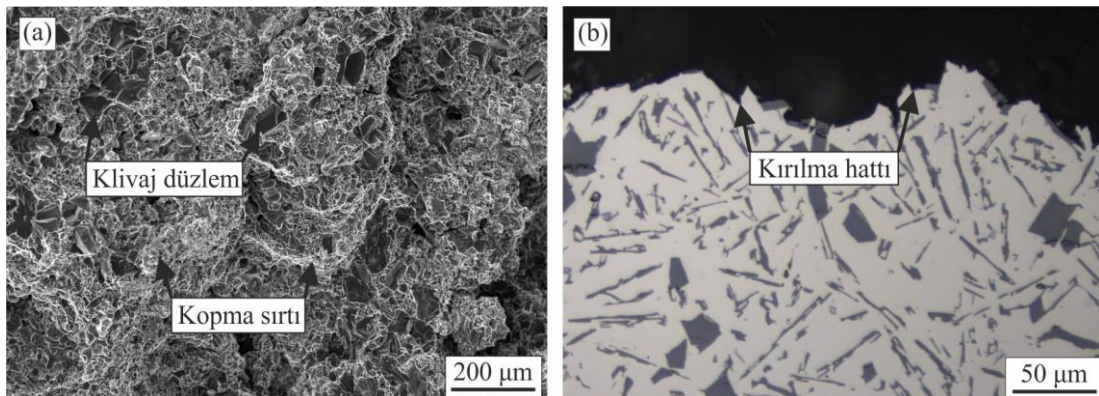
Şekil 4. Al-17Si-4Cu-0.6Mg alaşımlarının iç yapısının (a) optik mikroskop görüntüsü (b) SEM görüntüsü

İncelenen alaşımların yoğunluk, sertlik, akma, çekme dayanımları ve kopma uzaması değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Bu tabloda Al-17Si alaşımlarının yoğunluğunun bakır katkısı ile arttığı, Al-17Si-4Cu alaşımına %0,6 oranında magnezyum katılması durumunda ise belirgin bir değişikliğin olmadığı görülmektedir. İkili Al-17Si alaşımına %4 oranında bakır katılması durumunda sertlik, akma ve çekme dayanımı değerlerinin arttığı, kopma uzaması değerinin ise bir miktar düştüğü görülmektedir. Üçlü Al-17Si-4Cu alaşımına %0,6 oranında magnezyum katılması durumunda ise söz konusu alaşımların sertlik, akma ve çekme dayanımları değerlerini arttırdığı, kopma uzaması değerinde ise az da olsa bir düşme olduğu gözlemlendi (Tablo 2).

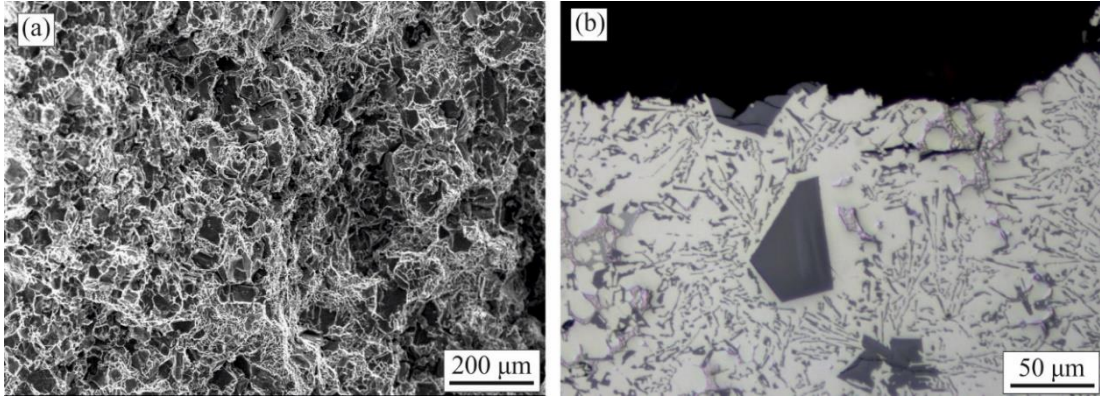
Tablo 2. İncelenen alaşımların mekanik özellikleri

Alaşım	Yoğunluk ($gr \times mm^{-3}$)	Sertlik (BSD)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
Al-17Si	2,56	54±1	94±2	128±2	2,1
Al-17Si-4Cu	2,69	86±1	143±2	154±2	0,9
Al-17Si-4Cu-0.6Mg	2,72	102±1	146±2	160±2	0,8

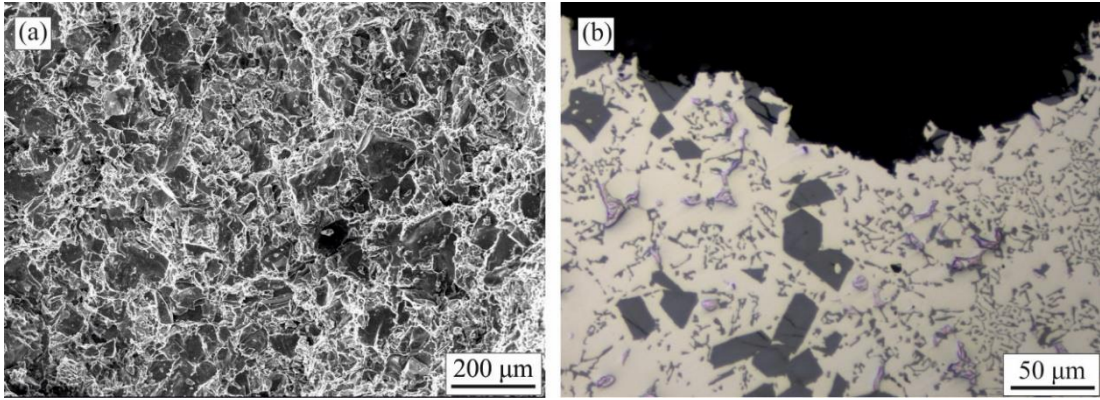
Üretilen alaşımların çekme deney numunelerinin kırılma yüzeylerini ve yüzey altı kesitlerini gösteren SEM fotoğrafları Şekil 5-7’de verilmiştir. Yüzey fotoğrafları (Şekil 5-7) kırılma yüzeylerinde, çekme yönünde uzamış kopma sırtları oluştuğunu, bu sırtların arasında geniş ve düz yüzeylerin yer aldığını göstermektedir. Yüzey altı fotoğraflarında ise kırılma hattının (çatlağının) alaşımlarda özellikle dendirit sınırlarını takip ederek ilerlediğini göstermektedir.



Şekil 5. Al-17Si alaşımlarının (a) kırılma yüzeyinin SEM ve (b) kırılma yüzey altı kesitinin optik görüntüsü

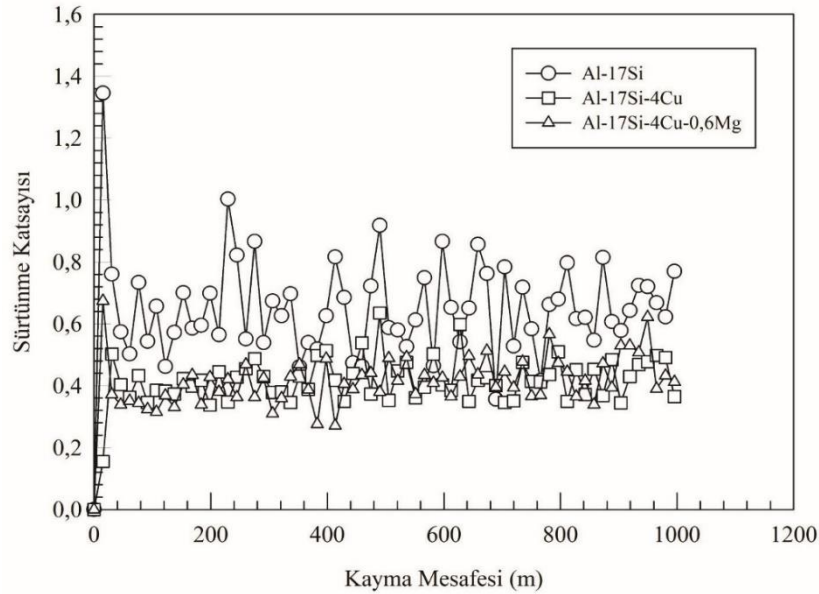


Şekil 6. Al-17Si-4Cu alaşımının (a) kırılma yüzeyinin SEM ve (b) kırılma yüzeyi altı kesitinin optik görüntüsü

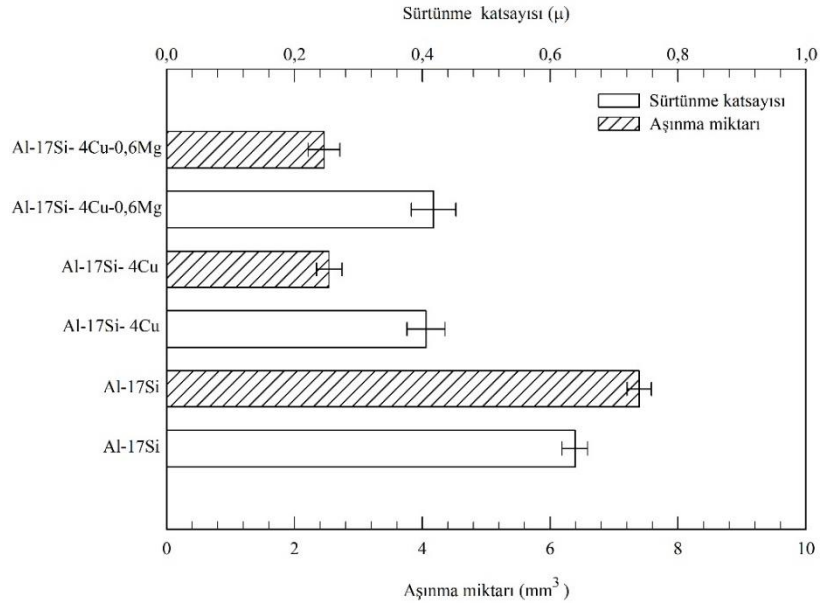


Şekil 7. Al-17Si-4Cu-0,6Mg alaşımının (a) kırılma yüzeyinin SEM ve (b) kırılma yüzeyi altı kesitinin optik görüntüsü

Al-17Si, Al-17Si-4Cu ve Al-17Si-4Cu-0,6Mg alaşımlarının sürtünme ve aşınma deneyleri boyunca sürtünme katsayılarının yola göre değişimini gösteren eğriler Şekil 8’de, deneyler sonunda hesaplanan ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma kaybı değerleri Şekil 9’da verilmiştir. Bu tablodan da görüleceği gibi Al-17Si alaşımına bakır ve magnezyum katılması alaşımların hem sürtünme katsayısını hem de aşınma nedeniyle meydana gelen hacim kaybı değerlerini azaltmaktadır.

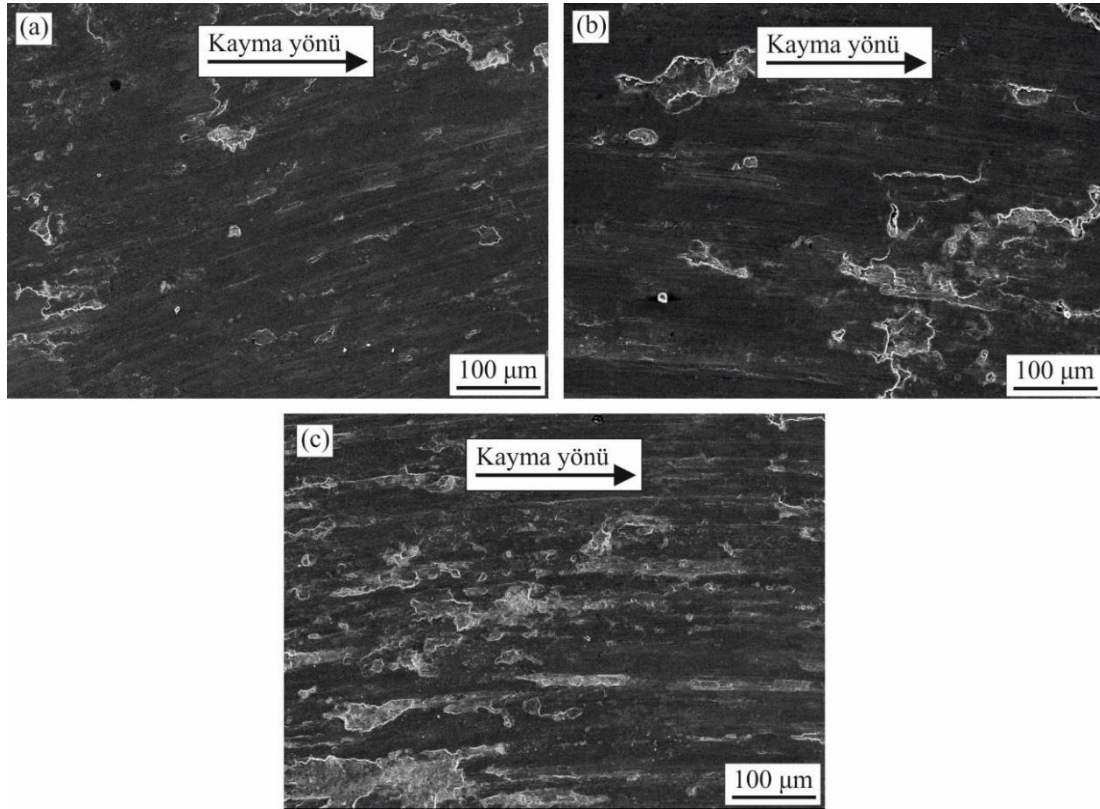


Şekil 8. Al-17Si, Al-17Si-4Cu ve Al-17Si-4Cu-0,6Mg alaşımlarının sürtünme katsayısının yola göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 9. Alaşımların sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı değerlerini gösteren çubuk diyagram

Üretilen alaşımlara ait deney numunelerinin aşınan yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 10' da verilmiştir. Bu fotoğraflar numunelerin aşınma yüzeylerinde sıvama tabakalarının, ince çiziklerin ve soyulmaların oluştuğunu göstermektedir. Yüzeyde oluşan sıvama tabakasının ikili Al-17Si alaşımında en yüksek olduğu, bakır ve magnezyum katkıları ile birlikte sıvama tabakalarının azaldığı görülmüştür.



Şekil 10. (a) Al-17Si, (b) Al-17Si-4Cu ve (c) Al-17Si-4Cu-0,6Mg alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

4. Tartışma

İkili Al-17Si alaşımının içyapısının primer silisyum, ötektik Al-12Si, alüminyumca çok zengin α (dendirit) ve β (Al-Fe-Si) fazlarından oluştuğu gözlemlendi (Şekil 2). Primer silisyum parçacıklarının iri (kaba) ve köşeli, ötektik faz içerisindeki silisyum parçacıklarının ise ince ve uzun bir yapıya sahip oldukları görüldü (Şekil 2). Bu içyapının oluşumu ikili Al-Si faz diyagramına (ASM Handbook, 1990) ve söz konusu alaşımın katılma davranışına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki; Al-17Si alaşımı ötektik bileşimden (ağırlıkça %12,6Si) daha yüksek oranda silisyum içerdiği için ötektik üstü bir alaşımdır. Ötektik üstü alaşımlarda soğuma (katılma) sırasında önce ergime noktası daha yüksek olan silisyumca zengin primer silisyum parçacıkları katılmaktadır. Silisyum katıldıkça sıvı metal içerisindeki silisyum oranı azalır, alüminyum oranı artmaktadır. Bu durum henüz

katılaşmamış olan metaldeki silisyum oranı ötektik bileşim oranına düşünceye kadar devam etmekte ve sıcaklık ile kimyasal bileşim ötektik noktadaki değerlere düştüğünde, alüminyum bir matris üzerinde ince uzun (iğne) şekilli silisyum parçacıklarının yer aldığı bir görünüme sahip ötektik faz oluşumu ile sonuçlanmaktadır. Alüminyumca çok zengin α fazı ise katılma sıcaklığı ötektik fazın katılma sıcaklığından (577°C) daha yüksek (660°C) olan alüminyumun denge dışı soğuma nedeniyle ötektik fazdan daha önce katılması sonucu oluşmuş olabilir.

Al-17Si alaşımına % 4 oranında bakır ilavesi yapıldığında içyapıda bakırca zengin θ (CuAl_2) fazının oluştuğu gözlemlendi (Şekil 3). Bu gözlemler bakırın alüminyum içerisindeki çözünürlüğüne dayandırılarak açıklanabilir. İkili Al-Cu denge diyagramına (ASM Handbook, 1990) göre bakırın α -alüminyum fazı içerisinde oda sıcaklığında düşük oranlarda çözüldüğü bilinmektedir. Bakır katkı oranının çözünürlük limitini aşması durumunda fazlalık bakırın alüminyum ile reaksiyona girerek θ (CuAl_2) fazını oluşturduğu anlaşılmaktadır. Söz konusu θ (CuAl_2) fazının alüminyumca zengin α dendirit sınırlarında yer aldığı görülmektedir. θ (CuAl_2) fazının dendirit sınırlarında konumlanması alaşımın soğuma, bir başka deyişle katılma davranışına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki; soğuma sırasında önce ergime sıcaklığı en yüksek olan silisyum sıvı metal içerisinde katılarak primer silisyum fazını oluşturur. Primer silisyum içerisinde gerek alüminyum, gerekse bakırın katı çözünürlüğü oldukça sınırlı olduğundan sıvı metal içerisindeki silisyum oranı azalırken alüminyum ve bakır oranı artar. Soğuma devam edip sıvı metalin sıcaklığı alüminyumun katılma sıcaklığına (yaklaşık 660 °C) düştüğünde alüminyum çekirdekleri denge dışı soğuma nedeniyle katılmaya başlar. Soğuma devam ettikçe α çekirdekleri sıvı metalden alüminyum çekip farklı yön ve doğrultularda büyüyerek dendirit haline gelir. Sıcaklığın θ fazının katılma sıcaklığı olan yaklaşık 620 °C' ye düşmesiyle bakırca zengin θ (CuAl_2) fazı katılır. Sıvı metal ile yoğunluk farkından ve en son katılan ötektik fazın kendine özgün bir kimyasal bileşimi olması nedeniyle θ fazı ötektik faz dışına, bir başka deyişle ötektik faz ile daha önce katılmış olan α çekirdeklerine kadar itilir. Sıcaklık ve kimyasal bileşim ötektik noktanın değerlerine (%12,6Si ve 577 °C) ulaştığında ötektik faz da katılır ve θ fazı ötektik faz ile dendirit sınırları arasında kalmış olur.

Dörtlü Al-17Si-4Cu-0,6Mg alaşımının içyapısında üçlü Al-17Si-4Cu alaşımının içyapısında görülen fazlara ilave olarak Mg_2Si fazının oluştuğu ve ayrıca β (Al-Fe-Si) fazının form değiştirerek π (Al-Mg-Fe-Si) fazına dönüştüğü görüldü (Şekil 4). Dörtlü alaşımın içyapısındaki π fazının safsızlıktan gelen demirin alaşımın bileşiminde bulunan alüminyum, silisyum ve magnezyum ile bileşik oluşturmasından kaynaklandığı söylenebilir. Al-17Si-4Cu-0,6Mg alaşımının içyapısındaki ötektik silisyum parçacıklarının üçlü alaşımdakine göre daha ince ve kısa olduğu gözlemlendi. Bu durum klasik çekirdeklenme teorisine göre açıklanmaktadır (Li vd., 2017). Şöyle ki, çekirdeklenme sırasında biri hacim serbest enerjisi diğeri yüzey serbest enerjisi olmak üzere iki tür enerji değişimi olur. Hacim serbest enerjisi sıvının katıya dönüşümü sırasında açığa çıkar, yüzey serbest enerjisi ise katılma sırasında yeni katı yüzeylerin oluşması için gerekir. Bu durum aşırı doymuş bir çözelti içerisinde küresel bir çekirdeğin oluşumu için gerekli olan serbest enerji değişimi toplamı $\Delta G_T = 4/3 \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma$ bağıntısı ile verilmektedir (Jreidini vd., 2018). Söz konusu bağıntıda yer alan ΔG_v ve γ terimleri sırasıyla hacim serbest enerjisi ve özgül yüzey serbest enerjisini göstermektedir. Bu bağıntıdan anlaşılacağı üzere çekirdek oluşumu için gerekli olan serbest enerji değişimi toplamı, γ (yüzey serbest enerjisi) düştükçe azalacaktır. Mg katılarının Al-Si alaşımlarında katı sıvı ara yüzey gerilimini dolayısıyla yüzey serbest enerjisini azaltıcı etkisi olduğu bilinmektedir (Li vd., 2017). Bu nedenle katı-sıvı ara yüzeyin meydana gelmesi için gerekli olan enerji miktarının düşmesine yol açarak ötektik yapının modifiye olmasını sağlamış olabilir. Ayrıca üçlü ötektik dönüşüm sıcaklığının (Sıvı \rightarrow Al + Si + Mg_2Si) ikili ötektik dönüşüm sıcaklığından (Sıvı \rightarrow Al + Si) daha düşük olması da çekirdeklenmenin daha kolay olmasına ve ötektik parçacıkların küçülmesine sebep olmuş olabilir.

Al-17Si alaşımına bakır katılması (ağırlıkça %4) durumunda alaşımın sertlik, akma ve çekme dayanımı değerlerinin sırasıyla %59, 52 ve 20 oranlarında arttığı, kopma uzaması değerinin ise %57 oranında azaldığı görüldü (Tablo 2). Sertlik ve mukavemet değerlerindeki artışın hem bakırın alüminyum içerisinde çözünmesiyle oluşan katı çözelti hem de bakırın alüminyum ile tepkimeye girerek oluşumuna yol açtığı θ fazının neden olduğu ikinci faz sertleştirme mekanizmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Katı çözelti oluşumunda çözen alüminyumun kafes yapısı içerisinde çözünen bakır atomları boyut farklılığından dolayı kafeste çarpılmaları neden olduğu, bu çarpılmaların neden olduğu iç gerilmelerin de dislokasyon hareketini zorlaştırma ve/veya engelleme suretiyle sertlik ve mukavemete artışa yol açtığı düşünülmektedir (Savaşkan, 2009). Diğer taraftan ikincil faz çökmesinin alaşımların kafes yapısında neden olduğu iç gerilmeler nedeniyle dislokasyon hareketlerinin zorlaştığı bunun da malzemelerin sertlik ve mukavemet değerlerinde artışa yol açtığı bilinmektedir (Savaşkan, 2009). Bakır katısının Al-17Si alaşımının kopma uzaması değerinde neden olduğu azalma θ fazının kırılma sırasında çatlak yolunu azaltıp kırılmayı kolaylaştırmasından kaynaklanmış olabilir. Zira kırılma yüzey altı fotoğraflarında çatlakların dendirit sınırını dolandıran θ fazı üzerinden daha az yol alarak ilerlediği görülmektedir (Şekil 5b, 6b ve 7b).

Al-17Si-4Cu alaşımına %0,6 oranında magnezyum katılması durumunda oluşan dörtlü alaşımın sertlik, akma ve çekme dayanımı değerlerinin sırasıyla %19, 2 ve 4 oranlarında arttığı, kopma uzaması değerlerinin ise %3 oranında azaldığı belirlendi (Tablo 2). Mukavemet değerlerindeki artışın Mg katısının neden olduğu katı çözelti mekanizması, ikincil faz oluşumu ve dispersiyon sertleşmesi mekanizmalarından kaynaklandığı söylenebilir. Nispeten içyapıda daha sıkı formda yer alan ötektik silisyumun fazlarının arasındaki mesafe azaldıkça dislokasyon hareketleri için gerekli gerilme artmaktadır. Bu durum dispersiyon sertleşmesi mekanizmasında $\tau_a = (2Gb/L)$ formülü ile verilmektedir (Bacon vd., 1973). Burada G kayma modülünü, b Burgers vektörünü ve L partiküller arası mesafeyi ifade etmektedir. Söz konusu mekanizma dislokasyonların hareket edebilmesi ve/veya yenilerinin meydana gelmesi için gerekli olan gerilmenin partiküller arası mesafe azaldıkça artmakta olduğunu göstermektedir. İçyapıda ikincil faz olarak görülen Mg_2Si bileşiği çökme sertleşmesi mekanizması ile α matrisinin kafes düzlemlerini çarpıtarak dislokasyonların hareketini engelleyip mukavemetin ve sertliğin artmasına neden olmuş olabilir. Nispeten sert ve gevrek olduğu bilinen Mg_2Si bileşiğinin alüminyumca zengin dendirit sınırlarında yer alması çatlakların ilerlemesini kolaylaştırarak kopma uzamasının azalmasına sebep olmuş olabilir. Ayrıca klivaj kırılma mekanizmasında kırılma yüzey enerjisi en düşük düzlemlerde meydana

geldiğinden ve Mg katkılarının alaşımın yüzey serbest enerjisini düşürdüğü bilindiğinden (Li vd., 2017) klivaj kırılmayı kolaylaştırarak alaşımın kopma uzamasının azalmasına sebep olmuş olabilir.

Alaşımın çekme deneyi numunelerine ait kırılma yüzeylerinin kopma veya ayrılma sırtları(çanakları) ile klivaj düzlemlerinden oluştuğu görüldü (Şekil 5a, 6a ve 7a). Bilindiği üzere kırılma yüzeylerindeki klivaj düzlemleri gevrek kırılma, sırt veya çanak oluşumları ise sünek kırılma belirtileridir (Salleh vd., 2015). Klivaj kırılma mekanizmasında malzemede kırılma klivaj düzlemleri olarak adlandırılan belirli kristalografik düzlemler boyunca meydana gelmektedir. Klivaj düzlemleri yüzey enerjisi en düşük olan düzlemlerdir. Tek eksenli gerilme halinde klivaj düzlemine dik normal gerilmelerin kritik bir değeri aşması durumunda atom bağlarının kopması sonucu klivaj kırılmaları oluşur. Her bir tane içerisindeki bir düzlemde kırılma meydana geldiğinden klivaj kırılma sonrası ortaya düz bir görünüm sergileyen kırılma yüzeyleri çıkar. Sünek kırılma mekanizmasında ise kayma gerilmesinin kritik bir değeri aşması durumunda kayma gerilmesine karşı direnci az olan kayma düzlemlerinin kayması sırasında atom bağlarının kopması bölgesel ve homojen olmayan plastik deformasyona sebep olur. Kırılma sırasında çatlak çekme doğrultusuna dik ve/veya çekme eksenine 45° lik açı yapan düzlemlerde ilerleyerek sırt kısımlarını oluşturacak şekilde deformasyon meydana gelmektedir.

Çekme deneyi numunelerinin kırılma yüzey altı fotoğrafları kırılma hattının (çatlağının) içyapıdaki dendirit sınırlarını takip ederek ilerlediğini göstermektedir (Şekil 5b, 6b ve 7b). Bu bulgular üretilen alaşımların yapısal özelliklerine dayandırılarak irdelenebilir. Şöyle ki, alaşımların içyapısında yer alan primer ve ötektik silisyum parçacıklarının kırılma karakteristiği taneler arası kırılma şeklindedir (Jiao vd., 2019, Jeon vd., 2019). Bunun nedeni, matris içerisindeki gerilmenin sert silisyum parçacıkları üzerine daha yüksek oranda iletilmesi ve silisyum parçacıklarının dayanım değerlerinin matris içerisindeki diğer fazlara göre daha erken aşılmasıdır. Silisyum parçacıklarının dayanım değerlerinin aşılması sonucu oluşan çatlaklar alüminyumca zengin α fazı sınırları boyunca ilerleyerek kırılmaya sebep olurlar. Ayrıca içyapıda dendiritler arası bölgede toplandıkları görülen nispeten gevrek θ , β , π ve Mg_2Si fazı dendiritler arasındaki bağın zayıflamasına ve söz konusu bölgelerin gevrekleşmesine yol açmaktadır. Bu bölgelerde meydana gelen gerilme yığılması sonrası söz konusu fazların kırılması ya da α fazından ayrılması nedeniyle oluşan çatlakların dendiritler arası bölgeleri takip ederek ilerleyip kırılmaya sebep olduğu düşünülmektedir.

Üretilen alaşımların sürtünme katsayılarının yola göre değişimini veren eğriler Şekil 8'de verilmiştir. Bu eğriler alaşımların sürtünme katsayılarının deneylerin başlangıç aşamasında hızlı bir artış gösterdikten sonra azalarak belli aralıklarda kararlı değerler sergilediğini göstermektedir. Deneylerin başlangıç aşamasında sürtünme katsayılarında gözlenen artış yüzeyler arasındaki pürüzler nedeniyle temas alanının düşük, bu nedenle basıncın yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sürtünme katsayısı değerlerinin alınan yol (kayma mesafesi) arttıkça azalarak kararlı değerlere ulaşması ise temas eden yüzeylerin birbirine alışması nedeniyle sürtünme kuvvetinin azalmasından kaynaklanmış olabilir. Deneyler boyunca alaşımların sürtünme katsayılarında gözlenen dalgalanmalar aşınma parçacıklarının veya plastik deformasyon sonucu yüzeylerde oluşan plastik deformasyonun sürtünme kuvvetinde yol açtığı değişimlerden kaynaklanmış olabilir.

Üretilen alaşımlarda bakır ve magnezyum katkılarının alaşımların sürtünme katsayısını azalttığı görüldü (Şekil 9). Alaşımların sürtünme katsayılarında meydana gelen bu azalma söz konusu katkı elementleri ile alaşımların sertlik ve mukavemetlerinin artması sayesinde uygulanan yükün taşınmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bu durumu Bowden ve Tabor' un kaynak bağları teorisine göre açıklamak mümkündür. Bu teoriye göre yüzeyler belirli pürüzlülük noktalarında temas halinde bulunmaktadır. Uygulanan yük bu temas noktaları tarafından taşınır. Bu durum Bowden ve Tabor tarafından $W = A \times P_0$ şeklinde ifade edilmiştir (Hutchings & Shipway, 2017). Burada W uygulanan normal yükü, A gerçek temas alanını, P_0 akma dayanımını göstermektedir. Temas eden yüzeyler üzerindeki oksit tabakaları arasında bağlar oluşur. Yük uygulandıktan sonra söz konusu temas noktalarında çok yüksek basınçlar meydana gelmesi sonucu söz konusu oksit tabakaları kopar ve metalik temas meydana gelir (Hutchings & Shipway, 2017, Stachowiak & Batchelor, 2005). Yüksek basıncın da etkisiyle metalik temasın meydana geldiği noktalarda moleküler bağ şeklinde mikroskobik kaynak bağları oluşur. Oluşan kaynak bağları oksit tabakasından çok daha kuvvetlidir. Temas eden yüzeylerin izafi hareketi sırasında bu kaynak bağlarının kopması gereklidir (Hutchings & Shipway, 2017, Stachowiak & Batchelor, 2005). Bunun yanında sert pürüzlerin yumuşak yüzey içerisinde ilerlerken meydana getirdiği plastik deformasyon ve bu deformasyon sonucu oluşan parçacıkların etkileşimi sonrası ortaya çıkan direnç te sürtünme kuvvetini etkilemektedir. Dolayısıyla sürtünme kuvveti $F = A \times S + P_e$ şeklinde ifade edilebilir (Stachowiak & Batchelor, 2005). Burada A gerçek temas alanı, S kaynak bağlarının kopması için gerekli kayma kuvveti, P_e sert pürüzlülüklerin yumuşak matris içerisinden geçmesi için gerekli kuvveti ifade etmektedir. P_e ifadesinin değeri $A \times s$ ifadesinden küçük olduğundan Bowden ve Tabor tarafından ihmal edilmiştir. Sonuç olarak sürtünme kuvveti $F = A \times S = (W \times S) / P_0$ şeklinde yazılabilir. Sürtünme katsayısı ise $\mu = S / P_0$ şeklinde ifade edilebilir (Stachowiak & Batchelor, 2005). Söz konusu formülden görülebileceği üzere sürtünme numunelerinin alaşım elementi katkısı ile artan akma ve çekme dayanımları temas halinde olan noktaların plastik deformasyona olan direncini artırarak oluşacak metalik bağların oranını düşürecektir. Aynı zamanda artan sertlik ile birlikte pürüzlülüklerin yumuşak matris içerisine batması zorlaşacağından sürtünme kuvveti üzerinde olumlu etkisi olacaktır. Her ne kadar artan akma gerilmesi ile birlikte metal-metal kaynak bağlarının kırılması için daha yüksek kesme kuvveti gerekecek ise de sürtünme sırasında oluşan oksit ve/veya sıvama tabakası bu kaynak bağlarının oluşumunu azaltırken artan akma ve çekme dayanımı sayesinde yük taşıma kolaylaşarak sürtünme katsayısının azalması sağlanmış olabilir.

Alaşımın hacim kaybı değerlerinin bakır ve magnezyum katkılarıyla sırasıyla %57 ve 11 oranlarında azaldığı belirlenmiştir (Şekil 9). Adhesif aşınma kanuna göre metallerde meydana gelen hacim kaybının kuru sürtünme durumunda uygulanan yük ile doğru orantılı, alaşımın akma dayanımı ile ters orantılıdır (Halling, 1978, Savaşkan & Hekimoğlu, 2016). Archard'a (Hutchings & Shipway, 2017) göre de hacim kaybının sertlik ile ters orantılı olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla mukavemet sertlik arttıkça

hacim kaybının azalması bir başka deyişle aşınma direncinin artması adhesif aşınma kanunu ve Archard eşitliği (Hutchings & Shipway, 2017, Halling, 1978, Savaşkan & Hekimoğlu, 2016) ile uyumludur.

Aşınma yüzeylerinde sıvama tabakalarının, soyulmaların ve çiziklerin oluştuğu gözlemlendi (Şekil 10). Sıvama tabakalarının aşınan özellikle sünekliği yüksek fazların basınç etkisiyle tekrar yüzeye yapışması, soyulmaların ise sıvanan malzemelerin kırılarak yüzeyden ayrılması sonucunda oluştuğu düşünülmektedir. Aşınma yüzeyindeki çiziklerin ise malzemeden koparak ayrılan ve aşındırıcı bilye ile numune yüzeyi arasında sıkışan sert parçacıkların basınç etkisiyle malzeme yüzeyini kazınması sonucunda oluştuğu söylenebilir.

5. Sonuç

Al-17Si alaşımının içyapısı primer silisyum, ötektik Al-12Si, alüminyumca çok zengin α (dendrit) ve β (Al-Fe-Si) fazlarından meydana gelmektedir. Al-17Si alaşımına % 4 oranında bakır ilavesi yapılması durumunda içyapıda bakırca zengin θ (CuAl_2) fazı oluşmaktadır. Al-17Si-4Cu bakır alaşımına %0,6 Mg katıldığında ise içyapıda üçlü Al-17Si-4Cu alaşımının içyapısında görülen fazlara ilave olarak Mg_2Si fazı oluşmakta ve ayrıca β (Al-Fe-Si) fazı form değiştirerek π (Al-Mg-Fe-Si) fazına dönüşmektedir. Al-17Si alaşımına %4 oranında bakır, Al-17Si-4Cu alaşımına ise %0,6 oranında magnezyum ilave edilmesi bu alaşımların sertlik, akma ve çekme dayanımı değerlerini artırmakta, kopma uzaması değerlerini ise azaltmaktadır. Al-17Si, Al-17Si-4Cu ve Al-17Si-4Cu-0,6Mg alaşımlarının kırılma yüzeyleri kopma veya ayrılma sırtları (çanakları) tarafından çevrilmiş klivaj düzlemlerinden oluşmaktadır. Bu alaşımlarda meydana gelen kırılma ise içyapıdaki dendrit sınırlarını takip ederek ilerlemektedir. Ayrıca bakır ve magnezyum katkıları Al-17Si alaşımının sürtünme katsayısını azaltıp, aşınma direncini artırmaktadır.

Referanslar

ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams. (1990). Novelty, MA: ASM International.

Bacon, D.J., Kocks, U.F., & Scattergood, R.O. (1973). The effect of dislocation self-interaction on the orowan stress. *Philosophical Magazine*, 28(6), 1241-1263. doi: 10.1080/14786437308227997

Campbell, J. (2011). *Complete casting handbook*, Waltham, MA: Elsevier.

Channappagoudar, S., Sannayallappa, N., Desai, V., & Karodi, V. (2015). Influence of combined grain refinement and modification on the Microstructure, tensile strength and wear properties of Al-15Si, Al-15Si-4.5Cu alloys. *International Journal of Materials Research*, 106(9), 962-969. doi:10.3139/146.111270

Davis, J.R. (2001). *Alloying: Understanding the Basics*, Ohio, MA: ASM International.

Di Giovanni, M.T., Mørtzell, E.A., & Saito, T. (2019). Influence of Cu addition on the heat treatment response of A356 foundry alloy. *Materials Today Communications*, 19, 342-348. doi:10.1016/j.mtcomm.2019.02.013

Fatahalla, N., Hafiz, M., & Abdulkhalek, M. (1999). Effect of microstructure on the mechanical properties and fracture of commercial hypoeutectic Al-Si alloy modified with Na, Sb and Sr. *Journal of Materials Science*, 34 (14), 3555-3564. doi:10.1023/A:1004626425326

Halling, J. (1978). *Principles of Tribology*. London, MA: The Macmillan Press Ltd.

Hiromi, N., & Wu, Y. (2016). Recent progress in eutectic silicon modification of Al-Si alloys. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 36(9), 924-930. doi:10.15980/j.tzzz.2016.09.008

Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology Friction and Wear of Engineering Materials*. MA: Elsevier

Jeon, J.H., Shin, J.H., & Bae, D.H. (2019). Si phase modification on the elevated temperature mechanical properties of Al-Si hypereutectic alloys. *Materials Science and Engineering A*, 748, 367-370. doi:10.1016/j.msea.2019.01.119

Jiao, X.Y., Wang, J., Liu, C.F., Guo, Z.P., Tong, G.D., Ma, S.L., Bi, Y., Zhang, Y.F., & Xiong, S.M. (2019). Characterization of high-pressure die-cast hypereutectic Al-Si alloys based on microstructural distribution and fracture morphology. *Journal of Materials Science and Technology*, 35(6), 1099-1107. doi:10.1016/j.jmst.2018.12.005

Jreidini, P., Kocher, G., & Provatas, N. (2018). Classical nucleation theory in the phase-field crystal model. *Physical Review E*, 97(4). doi:10.1103/PhysRevE.97.042802

Jorstad, J., & Apelian, D. (2009). Hypereutectic al-si alloys: Practical casting considerations. *International Journal of Metalcasting*, 3(3), 13-36. doi:10.1007/BF03355450



Kaba, M., Donmez, A., Cukur, A., Kurban, A.F., Cubuklusu, H.E., & Birol, Y. (2018). AlSi5Mg0.3 Alloy for the manufacture of automotive wheels. *International Journal of Metal Casting*, 12 (3), 614-624. doi: 10.1007/s40962-017-0191-2

- Kang, N., Coddet, P., Liao, H., Baur, T., & Coddet, C. (2016). Wear behavior and microstructure of hypereutectic Al-Si alloys prepared by selective laser melting. *Applied Surface Science*, 378, 142-149. doi: 10.1016/j.apsusc.2016.03.221
- Kumar, S., & Tewari, S.P. (2018). Metallurgical and Mechanical characterization of A319 Aluminum Alloy Casting Solidified Under Mold Oscillation. *International Journal of Metalcasting*, 12(1), 28-35. doi:10.1007/s40962-017-0135-x
- Lee, S.L., Cheng, Y.C., Chen, W.C., Lee, C.K., & Tan, A.H. (2012). Effects of strontium and heat treatment on the wear-corrosion property of Al-7Si-0.3Mg alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 135(2-3), 2012, 503-509. doi: 10.1016/j.matchemphys.2012.05.015
- Li, Q., Li, B., Li, J., Xia, T., Lan, Y., & Guo, T. (2017). Effects of the addition of Mg on the microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-7%Si alloy. *International Journal of Metalcasting*, 11(4), 823-830. doi: 10.1007/s40962-016-0131-6
- Medrano-Prieto, H.M., Garay-Reyes, C.G., Gómez-Esparza, C.D., Aguilar-Santillán, J., Maldonado-Orozco, M.C., & Martínez-Sánchez, R. (2016). Evolution of microstructure in Al-Si-Cu system modified with a transition element addition and its effect on hardness. *Materials Research*, 19, 59-66. doi: 10.1590/1980-5373-MR-2015-0673
- Miller, W.S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A.J., De Smet, P., Haszler, A., & Vieregge A. (2000). Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering A*, 280 (1), 37-49, doi: 10.1016/S0921-5093(99)00653-X
- Prabhudev, M.S., Auradi, V., Venkateswarlu, K., Siddalingswamy, N.H., & Kori, S.A. (2014). Influence of Cu addition on dry sliding wear behaviour of A356 alloy. *Procedia Engineering*, 97, 1361-1367. doi:10.1016/j.proeng.2014.12.417
- Qi, M., Kang, Y., Qiu, Q., Tang, W., Li, J., & Li, B. (2018). Microstructures, mechanical properties, and corrosion behavior of novel high-thermal-conductivity hypoeutectic Al-Si alloys prepared by rheological high pressure die-casting and high pressure die-casting. *Journal of Alloys and Compounds*, 749, 487-502. doi: 10.1016/j.jallcom.2018.03.178
- Salleh, M.S., Omar, M.Z., & Syarif, J. (2015). The effects of Mg addition on the microstructure and mechanical properties of thixoformed Al-5%Si-Cu alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 621. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.09.152
- Savaşkan, T. (2009). *Malzeme bilgisi ve muayenesi*. Trabzon, MA: Derya Kitabevi.
- Savaşkan, T., & Hekimoğlu, A.P. (2016). Relationships between mechanical and tribological properties of Zn-15Al-based ternary and quaternary alloys. *International Journal of Materials Research*, 107(7), 646-652. doi: 10.3139/146.111390
- Slattery, B.E., Perry, T., Edrisy, A. (2009). Microstructural evolution of a eutectic Al-Si engine subjected to severe running conditions, *Materials Science and Engineering A*, 512 (1-2), 76-81. doi: 10.1016/j.msea.2009.01.025
- Stachowiak, G.W., & Batchelor, A.W. (2005). *Engineering Tribology 3rd Edition*. MA: Butterworth-Heinemann
- Tiwari, K., Gautam, G., Kumar, N., Mohan, A., & Mohan, S. (2018). Effect of primary silicon refinement on mechanical and wear properties of a hypereutectic Al-Si alloy. *Silicon*, 10(5), 2227-2239. doi: 10.1007/s12633-017-9755-2



Kapalı Döngü Fiberoptik Jiroskop Sistemleri için Yerçekimi Arama Algoritmasına Dayalı PID Kontrolcü Tasarımı

Design of PID controller based on Gravitational Search Algorithm for Closed Loop Fiber optic Gyroscope

Hüsamettin Şerbetçi^{*1} , İsa Navruz² 

¹Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ÇANKIRI

²Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Başyuru/Received: 19/04/2019

Kabul/Accepted: 30/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Bu çalışmada kapalı döngü fiberoptik jiroskop sistemleri için yeni bir PID kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. PID kontrolcünün katsayıları yerçekimi arama algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Algoritma ile fiberoptik jiroskobun açısal hız değişimlerini izleme hatası minimize edilmiştir. Tasarlanan jiroskop sistemi bilgisayar ortamında test edilerek jiroskobun açısal hız değişimlerine tepkisi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar PID kontrolcünün sentezlenmesi sayesinde açısal hızın çok yüksek bir hassasiyetle ölçülebileceğini göstermiştir. Önerilen sentez yöntemi sadece fiberoptik jiroskoplar için değil kapalı döngü içeren pek çok farklı sistemde PID sentezinde başarılı sonuçlar üretebilir.

Anahtar Kelimeler

“Fiber jiroskop, Dönü sensörü, Yerçekimi arama algoritması, PID kontrolcü”

Abstract

In this study, a new PID controller design for closed loop fiber optic gyroscope systems was performed. The PID controller coefficients were determined by using the gravity search algorithm. The algorithm has minimized the error of tracking the angular velocity variations of the fiber optic gyroscope. The designed gyroscope system was tested numerically with a computer and the response of the gyroscope to angular velocity variations was analyzed. The results showed that the angular velocity can be measured with very high precision by the synthesis of the PID controller. The proposed synthesis method can produce successful results in PID synthesis in many different systems not only for fiber optic gyroscopes but also for closed loop.

Key Words

“Fiber gyroscope, Rotation sensor, Gravity search algorithm, PID controller”

1. Giriş

Açısal yön ve hızdaki değişimlerin bilinmesi, birçok sistem için büyük öneme sahiptir. Jiroskoplar açısal yön değişimini belirleyen sistemlerdir. Literatürde farklı türden birçok jiroskop yapısı önerilmiştir. Bunlardan başlıca olanlar ring lazer jiroskop (RLG), mekanik jiroskop (DTG), mikro elektromekanik (MEMS) jiroskop ve fiberoptik jiroskop yapısıdır. Geliştirilen tüm jiroskoplar içinde fiberoptik jiroskop yapısı sağladığı yüksek hassasiyet, yüksek hız, darbe ve titreşime karşı dayanıklılığı ile öne çıkmaktadır (López-Higuera, 2002).

Fiberoptik jiroskop yapısı, açık döngü fiberoptik jiroskoplar (ADFOJ) ve kapalı döngü fiberoptik jiroskoplar (KDFOJ) olmak üzere iki farklı yapılandırmada tasarlanabilir. Sağladığı yüksek hassasiyet ve sunduğu geniş ölçüm aralığı KDFOJ'nin dikkat çeken önemli bir özelliğidir.

Fiberoptik jiroskopların çalışma prensibi Sagnac etkisine dayanır. Sagnac (1913) tarafından ilk kez ortaya atılan bu etki jiroskop yapısının temelini oluşturmaktadır. Sagnac etkisi kapalı bir yol üzerinde birbirlerine zıt yönlerde ilerleyen iki ışık demeti arasındaki faz farkına sebep olur. Bu faz farkından yola çıkılarak sistemin açısal hızdaki değişim miktarı belirlenebilir. ADFOJ'den farklı olarak, KDFOJ'de Sagnac etkisinden kaynaklanan faz farkı geri beslemeli kontrolcü ile belirlenir ve sistemin denge durumunda çalışmasını sağlayacak kontrol işareti üretilerek faz modülatörüne uygulanır. Böylece sistemin sıfır dönme durumuna yakın çalışması amaçlanmaktadır. Sagnac etkisi ve kontrol işareti ile sistemin dengede çalıştırılması kontrolcü yardımı ile gerçekleştirilir.

Sagnac etkisine dayalı ilk jiroskop Rosenthal (1962) tarafından önerilen ring lazer jiroskoptur. Ring lazer jiroskop ışık demetlerinin bobin içerisinde birden fazla kez döndürülmesiyle ölçüm hassasiyetinin artırılmasını sağlamıştır. Geliştirilen ring lazer jiroskop sisteminin sağladığı yüksek hassasiyet ile jiroskop sistemleri önem kazanmış ve böylece yeni geliştirilecek optik jiroskop sistemlerine ışık tutmuştur. İlerleyen süreçte Howe ve Savet (1964) tarafından mekanik jiroskop (DTG) yapısı, Vali ve Shorthill (1976) tarafından fiberoptik jiroskop (FOG) yapısı ve Piyabongkarn vd. (2005) tarafından mikro-elektromekanik sistem (MEMS) yapıları geliştirilmiştir.

Kapalı döngü bir fiberoptik jiroskop sistemi için kontrolcü tasarımı önemli bir aşamadır. KDFOJ sistemlerinin geri besleme döngüsünü kontrol etmek için birçok yöntem mevcuttur. Bunlardan başlıcaları PID kontrolcü, serrodin modülasyonu ve FPGA tabanlı kontrolcü olarak sıralanabilir.

Navruz vd. (2017) tarafından ADFOJ tasarımından yola çıkarak geri besleme döngüsündeki hata sinyali kompanze eden bir KDFOJ sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sun vd. (2013) tarafından kapalı KDFOJ sisteminin minyatürleştirilmesi ve geri besleme döngüsünün kontrolü için FPGA tabanlı bir KDFOJ yapısı geliştirilmiştir. Babu vd. (2016) ADFOJ'nin yanı sıra basit yapı bir kontrolcü ile KDFOJ'yi MATLAB Simulink ortamında teorik olarak modellemiştir. Hotate ve Harumoto (1997) tarafından gürültüyü azaltacak serrodin modülasyona sahip bir fiberoptik jiroskop sistemi geliştirilmiştir. Jin vd. (2013) tarafından fiberoptik jiroskobun dinamik aralığını ve doğrusallığını iyileştirmek için serrodin modülasyonu önerilmiştir. Ayrıca faz modülatörü olarak LiNbO₃ faz modülatörü kullanılmıştır José Pérez vd. (2016) tarafından sinüzoidal faz modülasyonu ile kapalı döngü konfigürasyonlu serrodin modülasyonuna dayanan başka bir interferometrik fiberoptik jiroskop yapısı geliştirilmiştir. Ölçüm hassasiyeti düşük olmasına rağmen maliyet bakımından büyük ölçüde tasarruf sağlanmıştır. Pogorelaya vd. (2017) tarafından yayımlanan makalede KDFOJ yapısının geri besleme döngüsünü kontrol etmek için PID kontrolcüsü geliştirilmiştir. Fiberoptik jiroskobun transfer fonksiyonu belirlenerek analitik bir yol ile PID kontrolcünün en uygun K_p , K_i ve K_d katsayıları hesaplanmıştır.

Tasarlanacak kontrolcünün, Sagnac etkisinden kaynaklanan faz farkını hızlı bir biçimde takip ederek, faz modülatörüne uygulanacak kontrol işaretini yüksek hassasiyette üretmesi beklenmektedir. Geri beslemeli kontrol sistemi içeren uygulamalarda kontrol katsayılarının belirlenmesi, sistem tasarımının en kritik aşamalarından biridir. Bu çalışmada KDFOJ sistemi için, K_p , K_i ve K_d kontrol katsayılarının belirlenmesinde ilk defa yerçekimi arama (YA) algoritması kullanılmıştır. YA algoritması kullanan KDFOJ'nin sentezi ve test sonuçları MATLAB/SIMULINK programı ile gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kapalı Döngü Fiberoptik Jiroskop Sistemi

KDFOJ sisteminin temelini Sagnac etkisi oluşturmaktadır. Sagnac etkisinin anlaşılabilmesi için ilk olarak tek sarımlı ve r yarıçaplı bir fiber bobin ele alınır. Tek sarımlı ve r yarıçaplı fiber bobinin her iki ucuna, bir -3dB bağlayıcı yardımıyla aynı anda birbirlerine zıt yönlerde ilerleyen iki ışık dalgası gönderilir. Bobinin hareketsiz olduğu durumda ışık demetleri çıkışa aynı sürede varacağından bu ışık dalgalarının çıkışa varış süreleri,

$$t = \frac{2\pi r}{c} = \frac{L}{c} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir, burada c ışık hızı L ise ışığın aldığı yoldur.

Fiber bobin belirli bir açılal hız ile döndürüldüğünde ışığın fiber bobine giriş ve çıkış pozisyonları değişeceğinden, zıt yönlerde ilerleyen ışık demetleri çıkışa farklı zamanlarda ulaşacaklardır.

Zıt yönlerde ilerleyen iki ışık demeti arasındaki zaman farkı;

$$\Delta t = t_{cw} - t_{ccw} = \frac{LD\Omega}{c^2} \quad (2)$$

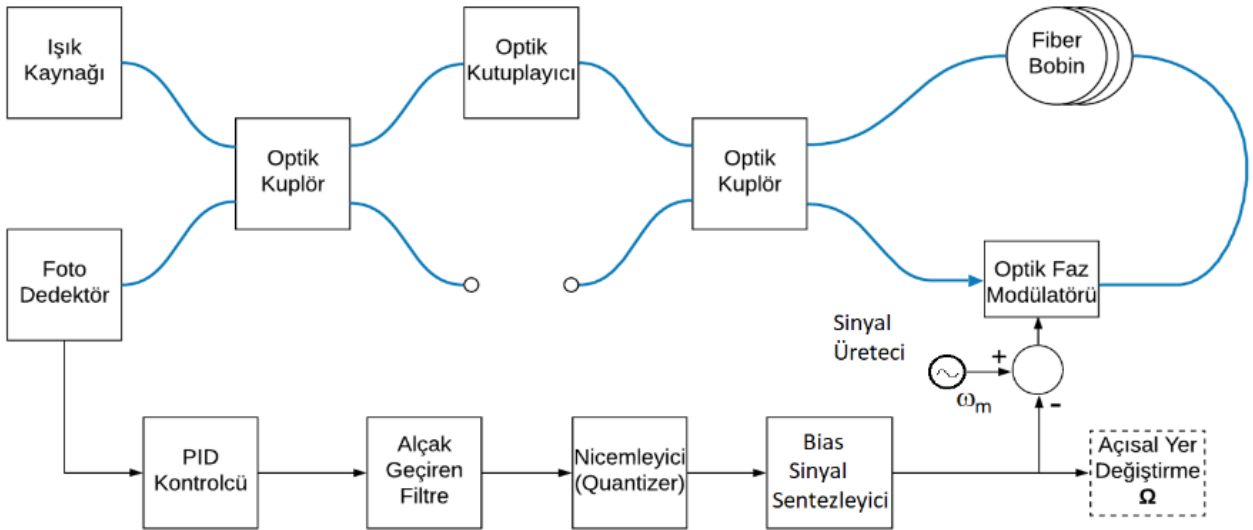
ile ifade edilir. Burada $D=2r$ fiber çapı ve $L=2\pi r$ ışığın tek sarımlı fiber bobinde alacağı yoldur. t_{cw} saat yönünde ilerleyen ışığın, t_{ccw} ise saat yönünün tersi yönünde ilerleyen ışığın çıkışa ulaşma süreleridir.

Fiber bobinin sarım sayısını artırmak ışık demetlerinin ilerleyeceği optik yolu artıracaktır. N sarımlı bir fiber bobin için ışık demeti N kat daha fazla yol alır ve buna bağlı olarak da Sagnac faz farkı artar. Böylece fiberoptik jiroskobun duyarlılığı artırılmış olur ve ışığın aldığı yol $L=2\pi rN$ şeklinde ifade edilir.

Δt zaman farkınının, açılal frekansı $\omega=2\pi f$ olan bir sürekli dalga için oluşturacağı Sagnac faz farkı,

$$\Phi_s = \frac{2\pi LD\Omega}{\lambda c} \quad (3)$$

ile hesaplanabilir. Şekil 1’de KDFOJ’nin blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 1. KDFOJ Sisteminin Blok Diyagramı

Fiber bobin döndürüldüğünde bir faz kayması meydana gelir. Oluşan faz kayması (Sagnac etkisi) fotodedektör tarafından algılanarak sinüzoidal değişen bir çıkış işareti üretilir. PID kontrolcü Sagnac etkisini kompanze eden bir işaret üretir. Böylece Sagnac etkisi giderilirken aynı zamanda faz kaymasından kaynaklanan açısal hız değişim bilgisi de elde edilir.

PID kontrolcünün çıkışında üretilen işaret bir alçak geçiren filtreden geçirilir. Daha sonra bu işaret, bir nicemleyici yardımı ile kuantaya seviyelerine dönüştürülerek faz modülatörüne uygulanır. Bu aşamada PID kontrolcü Sagnac etkisini kompanze ederek sistemi dengede çalışmaya zorlar. Şekil 1’deki sistemin fotodedektör çıkış işareti,

$$P_d = 0.5P_0(1 + \cos(\Delta\Phi_s(t) - \Delta\Phi_m(t))) \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlikteki $\Delta\Phi_s(t)$ Sagnac faz kaymasını ve $\Delta\Phi_m(t)$ ise faz modülasyonundaki bias faz değişimini gösterir. Sinüs biçimli bias faz modülasyonu $\Phi_m(t)$ Eş. 5' ile ifade edilebilir.

$$\Phi_m(t) = \Phi_0 \sin(\omega_m t) \quad (5)$$

Burada $\omega_m = 2\pi f_m$ olup f_m modülasyon frekansdır. Jiroskop sisteminin fiziksel dönmesi neticesinde oluşan Sagnac faz kaymasına ilave olarak faz modülasyonundan dolayı bias faz değişimi meydana gelecektir. Bias faz değişimi $\Delta\Phi_m(t)$ Eş. 6 ile hesaplanabilir.

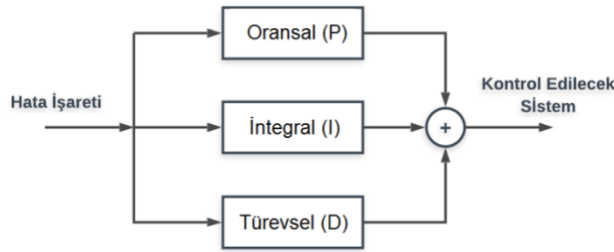
$$\Delta\Phi_m(t) = \Phi_0 [\sin(\omega_m t) - \sin(\omega_m t - \omega_m \tau)] \quad (6)$$

Jiroskop bobininde iki zıt yönde dolanan ışıktan biri t zamanında modülatörden geçerken $t-\tau$ anında diğer ışık ile modülatörde karşılaşır. Burada $\tau = NL/c$ ışığın fiber bobini dolanma süresidir. Çalışmada gerçekleştirilen kapalı döngü jiroskop tasarımında, fiber bobinin çevre uzunluğu $L=50$ cm, sarım sayısı $N=2000$, faz modülasyonu için uygulanan osilatörün frekansı $f_m=90$ kHz ve ışığın dalgaboyu ise telekom fiberlerde sıklıkla tercih edilen ve zayıflamanın en az olduğu dalgaboyu olan $\lambda=1550$ nm olarak belirlenmiştir.

2.2. PID Kontrolcü Tasarımı

Kapalı döngü kontrol sistemlerinde, tasarlanan sisteme uygun bir kontrolcü seçimi yapılmalıdır. Uygulanabilirliği, yüksek hassasiyeti, tepkime süresi ve gürültüye karşı duyarlılığı gibi sağladığı avantajlardan dolayı PID kontrolcü, son yıllarda en yaygın kullanılan kontrolcü türüdür.

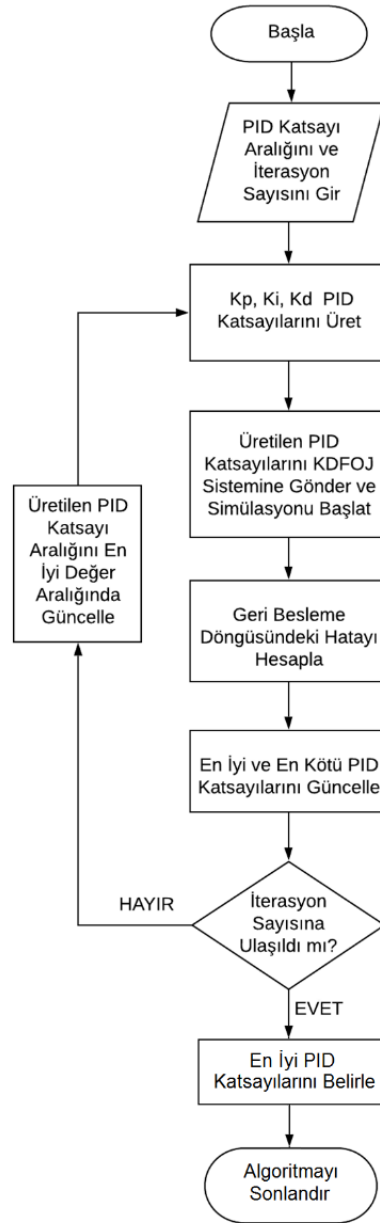
PID kontrolcü sırasıyla oransal, integral ve türevsel katsayıları ifade eden K_p , K_i ve K_d parametrelerini içermektedir. Bu parametrelerin doğru seçimi, bir geri beslemeli kontrol sistemi için oldukça önemlidir. Şekil 2'de bir PID kontrolcünün temel yapısı görülmektedir.



Şekil 2. PID Kontrolcünün Blok Diyagramı

Bir PID kontrolcünün hata işaretini minimize edebilmesi için K_p , K_i ve K_d katsayılarının en uygun değerlerde belirlenmesi gerekir. PID katsayılarını belirleyecek bu yöntem, kontrol edilecek sistemin niteliğine bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Geri beslemeli kontrol sistemleri için PID parametrelerinin tespit edilmesinde, öz-uyarlamalı ayarlama, açık ve kapalı döngü Ziegler-Nichols metodu (Meshram & Kanojiya, 2012, Alavi vd., 2012), bulanık mantık algoritmaları, Cohen-Coon methodu (Azman vd., 2017), Chien Hrones Reswick methodu (Hambali vd., 2014) ve yerçekimi arama algoritması gibi bir çok yöntem mevcuttur. PID katsayılarını belirleme aşamasında bazı sistemler için YA algoritması kullanılmasına rağmen literatürde YA algoritmasına dayalı kapalı döngü fiberoptik jiroskobu tasarımı bulunmamaktadır. Bu çalışmada bir KDFOJ sisteminin geri besleme döngüsünü kontrol edecek PID katsayılarını belirlemek için ilk defa YA algoritması kullanılmıştır.

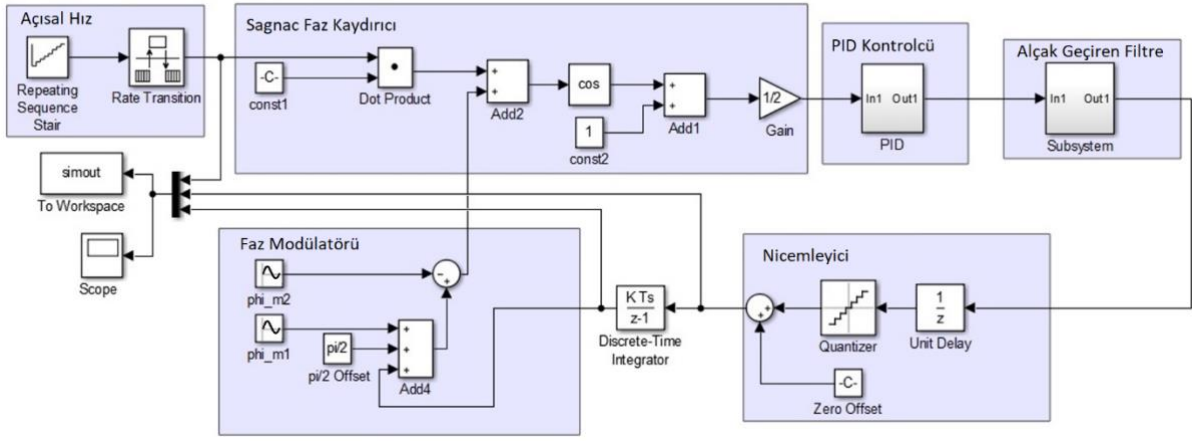
2.3 Yerçekimi Arama Algoritması ve Sistem Tasarımı YA algoritması Newton'un yerçekimi yasasına dayanmaktadır. Newton'un yerçekimi yasasına göre evrendeki her bir parçacık, diğer tüm parçacıkları kütleleri ile doğru orantılı ve aralarındaki mesafenin karesiyle ters orantılı bir güçle çeker. YA algoritması ilk olarak Rashedi vd. (2009) tarafından literatüre kazandırılmıştır. YA algoritmasında, problemin çözümü için PID parametreleri birer kütle olarak kabul edilir. Sistem kütlelerin ağırlıkları oranında etkileşim içerisindedir. Bu durum kütleler arası bilgi alışverişini mümkün kılmaktadır. Yerçekimi arama algoritması akış şeması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Yerkimi Arama Algoritması Akış Şeması

YA algoritması çalıştırılmadan önce ilk olarak başlangıç ve durdurma kriterlerinin seçilmesi gerekir. Kütle olarak seçilecek değer sayısı, bu kütlelerin ağırlık aralığı ve her bir iterasyon sayısı için algoritmanın üreteceği değer sayısı başlangıç koşulu olarak seçilmiştir. İterasyon sayısı ise algoritmanın durdurma kriteri olarak belirlenmiştir. Başlangıç ve durdurma kriterlerinin belirlenmesinin ardından algoritma koşturulur. Başlangıçta her bir PID katsayısı için belirlenen ağırlık aralığında, belirlenen sayıda değer üretilerek ilk iterasyon gerçekleştirilir. İlk iterasyonun bitiminde sistem hatası algoritma tarafından analiz edilerek en iyi ve kötü PID katsayı aralığı belirlenir ve algoritma içerisindeki ağırlık aralığı belirlenen en iyi PID katsayı aralığına göre güncellenerek ikinci iterasyona geçilir. Durdurma koşulunu sağlayacak iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar bu işlem her bir iterasyon sayısı için tekrar tekrar gerçekleştirilir. Aralığın sürekli güncellenmesi ile en iyi sonucu verecek PID katsayıları hassas bir şekilde belirlenir.

Tasarlanan KDFOJ sisteminin Simulink modeli Şekil 4’de verilmiştir. Sistemi test etmek için belirli adımlarla artan bir açısal hız değişimine karşılık gelen basamaklı bir fonksiyon uygulanmıştır. Bu fonksiyonun tanımı Şekil 4’ün sol üst kısmındaki *Açısal Hız* bloğunda tanımlanmıştır. Fiberoptik jiroskop sisteminin optik kısmında meydana gelen faz kaymaları $(\Delta\Phi_s(t), \Delta\Phi_m(t))$ Sagnac Faz Kaydırıcı bloğu içerisinde modellenmiştir. Dedektör çıkışında üretilen elektriksel işaret toplayıcı öncesinde sırasıyla *PID Kontrolcü*, *Alçak Geçiren Filtre*, *Nicemleyici* ve *Faz Modülatörü* içeren geri besleme döngüsüne uygulanmaktadır. Faz Modülatör bloğundaki ϕ_{m1} ve ϕ_{m2} işaretleri Eş. 6 ile verilen ifadedeki sinüs biçimli osilatörleri sentezlemek için kullanılmıştır. Maksimum açısal hız duyarlılığı için jiroskopun durağan durumda iken $\pi/2$ faz ötelemesini gerçekleyen “*pi/2 Offset*” değeri Faz Modülatörü bloğunda sağlanmıştır. Nicemleyici bloğundaki “*Zero Offset*” değeri jiroskopun durağan durumunda ürettiği DC seviyeyi sıfırlamak için uygulanmaktadır. Nicemleyici çıkışındaki hata işaretini minimize etmek için PID kontrolcünün katsayıları YA algoritması ile belirlenmiştir. Sistemin örnekleme zamanı $5 \cdot 10^{-7}$ olarak seçilmiştir.



Şekil 4. KDFOJ sisteminin Simulink modeli

PID kontrolcünün K_p , K_i ve K_d katsayıları YA algoritmasında birer kütle değişkenine karşılık gelmektedir. Bu katsayılarının tasarlanan geri beslemeli kontrol sisteminin karakteristiğine özgü uygun bir aralıkta sınırlandırılması gerekmektedir. Yapılan çalışmada, bir KDFOJ sistemi için PID katsayılarının sırasıyla $[0, 1]$, $[0, 1]$ ve $[0, 10^{-5}]$ aralıklarında değişebileceği öngörülmüştür. Algoritmanın başlangıcında her bir PID katsayısı için belirlenen aralıkta rastgele 50 farklı değer üretilmiş ve ilk iterasyon için algoritma koşturulmuştur. Algoritma 10, 25, 50, 75 ve 100 iterasyon sayılarında koşturularak elde edilen PID katsayıları Tablo 1'de sunulmuştur.

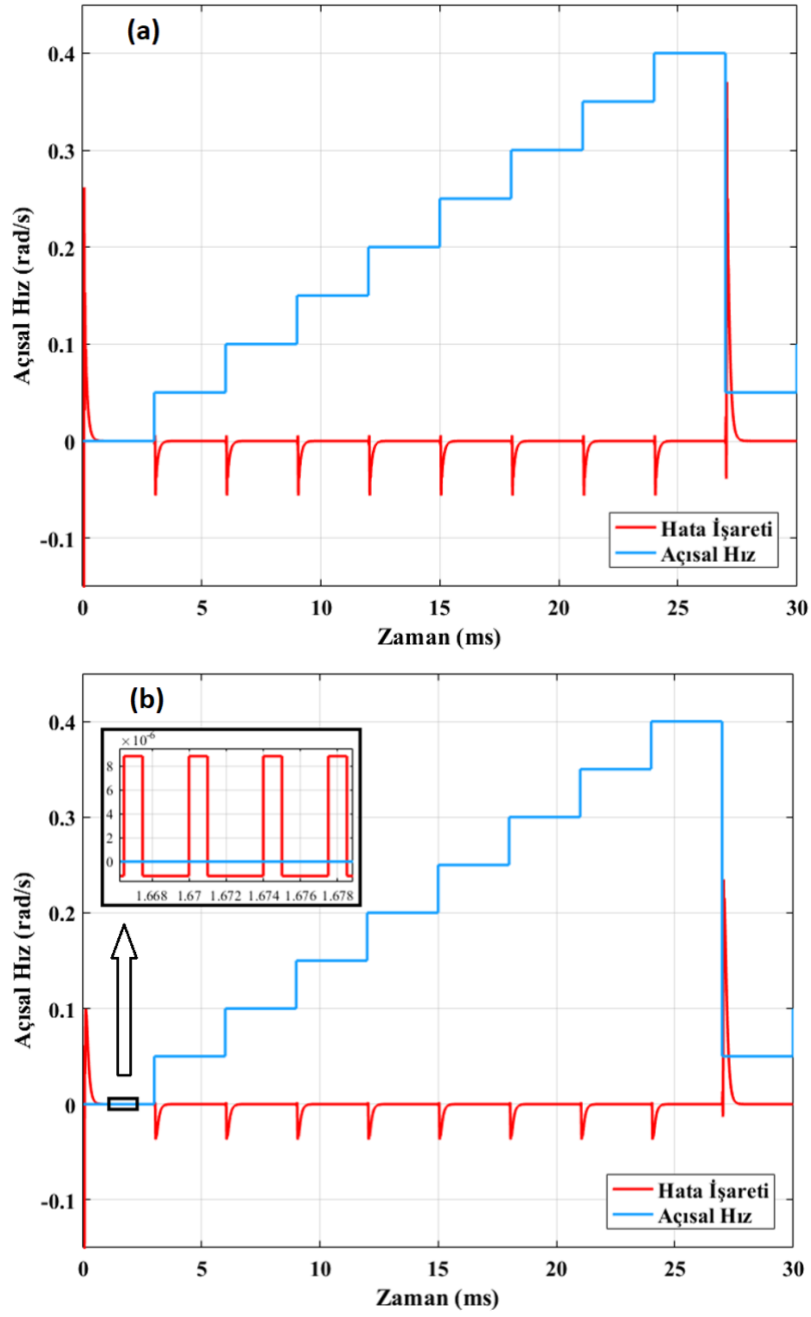
Tablo 1. YA Algoritması Sonucu Elde Edilen PID Katsayıları

İterasyon Sayısı	10	25	50	75	100
K_p	0.67244	0.66336	0.62432	0.65883	0.65636
K_i	0.27586	0.12478	0.01372	0.04568	0.06292
K_d	$8.84070 \cdot 10^{-6}$	$8.28791 \cdot 10^{-6}$	$1.99555 \cdot 10^{-6}$	$7.48106 \cdot 10^{-6}$	$7.20027 \cdot 10^{-6}$
Ortalama Hata	228.8147	228.3536	226.1376	225.7441	224.1979

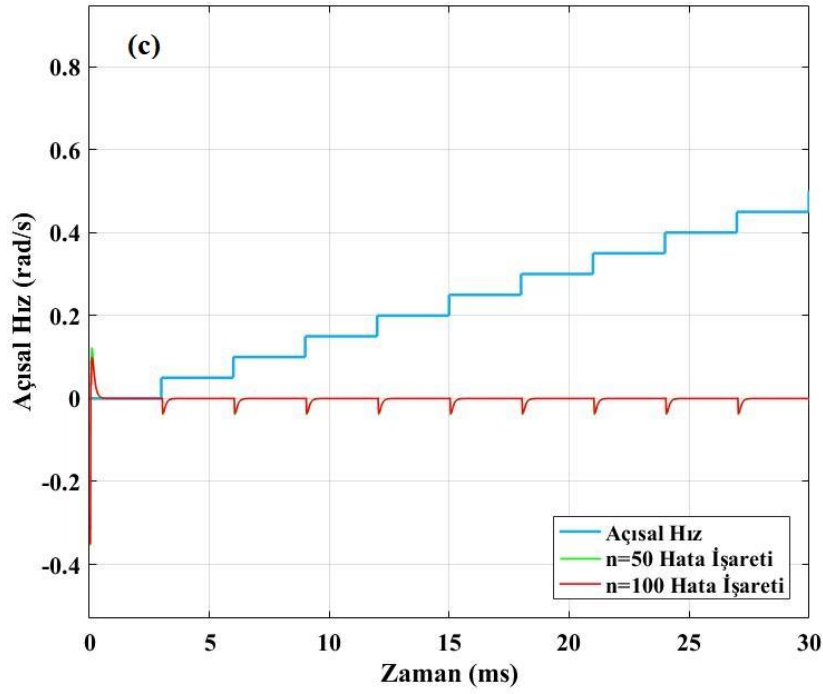
3. Bulgular

YA algoritması, akış şemasında da görüldüğü gibi sonlandırma işlemi iterasyon sayısı ile kontrol edilmiştir. Algoritma, iterasyon sayısı arttıkça hesaplanan PID katsayıları hata işaretini minimize edebilecek en uygun değerlere yakınsak sonuçlar üretmektedir. İterasyon sayısının fazlaca yüksek belirlenmesi hata sinyalinin azaltılmasında önemli bir katkı sağlamadığı gibi simülasyon süresini de uzatmaktadır. Şekil 5.c' de, 50 ve 100 iterasyon sayısı ile hesaplanan PID katsayılarına karşılık gelen simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Her iki iterasyon sayısı için elde edilen hata işaretleri ve açısal hız işaretleri hemen hemen aynı kalmaktadır. Yapılan denemelerde, tasarlanan jiroskop sistemi için PID katsayılarını belirleme işleminde hata sinyalini yeterince minimize edilebilecek iterasyon sayısının 50 seçilmesi yeterli olduğu tespit edilmiştir. İterasyon sayısının 50' den büyük seçilmesi, PID katsayılarının belirlenmesi işleminin gereğinden uzun sürmesine neden olacaktır. Şekil 5.a ve 5.b' de, sırasıyla 10 ve 50 iterasyon sonucunda üretilen hata işaretlerinin ve jiroskop girişine uygulanan açısal hızın, 30 ms boyunca zamanla değişimi görülmektedir.

Şekil 5' de jiroskop düzeneğinin dönmesiyle oluşan Sagnac faz kaymasının kısa sürede kompanze edildiği açıkça görülmektedir. Tasarlanan kontrol sisteminde, açısal hızın 0.05 rad/s ($2.8648^\circ/\text{s}$)' lik ani değişimine karşılık 10 iterasyon ile belirlenen PID kontrol sisteminde 0.057 rad/s genlikli bir ani hata işareti oluşurken, 50 iterasyonla bu genliğin 0.037 rad/s ye düştüğü gözlenmiştir. Bu hata işaretinin sıfırlanarak sistemin sıfır faz dengesine getirilmesi ise yaklaşık 0.96 ms sürmektedir. Açısal hızdaki 0.35 rad/s ' lik anlık bir hız değişiminin olduğu $t=27 \text{ ms}$ anında ise sisteminin 0.235 tepe genliğinde oluşan hata işaretini sıfır faz dengesine getirmesi yaklaşık 1.1 ms sürmektedir.



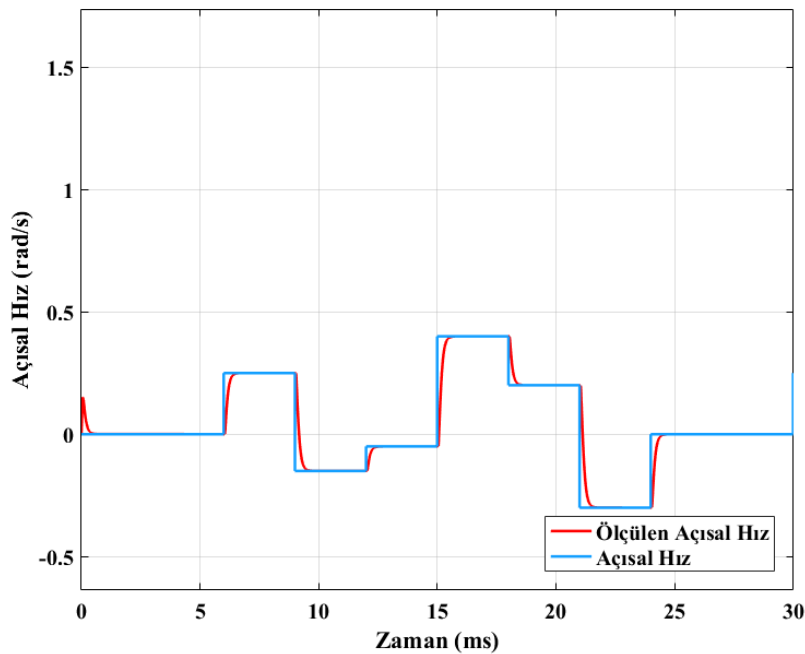
Şekil 5. Farklı iterasyon sayıları için jiroskop sisteminin cevabı (a) $n=10$; (b) $n=50$; (c) $n=50$ ve $n=100$



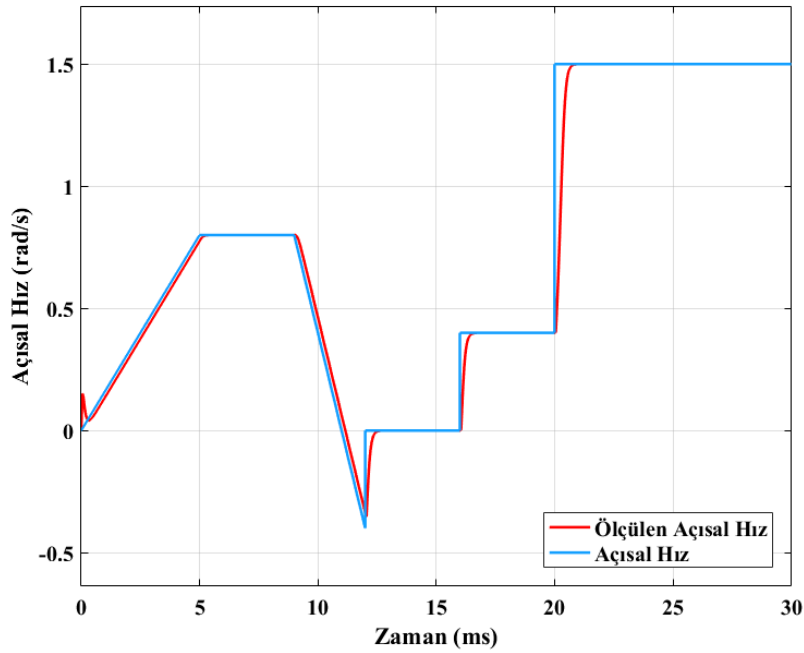
Şekil 5 (devam). Farklı iterasyon sayıları için jiroskop sisteminin cevabı (a) n=10; (b) n=50; (c) n=50 ve n=100

Sisteme verilen iki farklı açısal hız değişimine karşılık jiroskoptan ölçülen açısal hız değişim işaretleri Şekil 6 ve 7’ de gösterilmiştir. Şekil 6’ da, pozitif ve negatif yönde basamaklı değişken rastgele bir açısal hız değişimine karşılık jiroskoptan ölçülen hız bilgisi karşılaştırılmıştır. Şekil 7’ de ise yine pozitif ve negatif yönde rampa ve basamaklı değişken bir açısal hız değişimine karşılık sistemin ölçüm cevabı gösterilmektedir. Her iki grafikten de görüleceği üzere ölçülen hız bilgisinin, sisteme uygulanan mekanik dönü hareketini ifade eden açısal hız işaretini her iki yönde de yakından takip edebildiği anlaşılmaktadır. Sistemin geri besleme kolunda yer alan nicemleyici adım sayısının artırılmasıyla, sisteme uygulanan açısal hız ile ölçülen açısal hızın örtüşümü daha da iyileştirilebilir.

KDFOJ sistemlerinin performansında önemli ölçütlerden birisi de zero-bias testidir. Bu testte sistemin durağan hali yani girişine 0 rad/s açısal hız verilerek geri besleme döngüsü işareti test edilir. Zero-bias testinde sistemin geri besleme döngüsünden elde edilen işaretin hata değerinin sıfıra yakın bir değer olması beklenmektedir. Bu çalışmada tasarlanan KDFOJ sisteminin zero-bias cevabı, Şekil 5.b’ de görüldüğü gibi sıfıra oldukça yakın bir değer olan $8.8 \cdot 10^{-6}$ rad/s olarak belirlenmiştir.



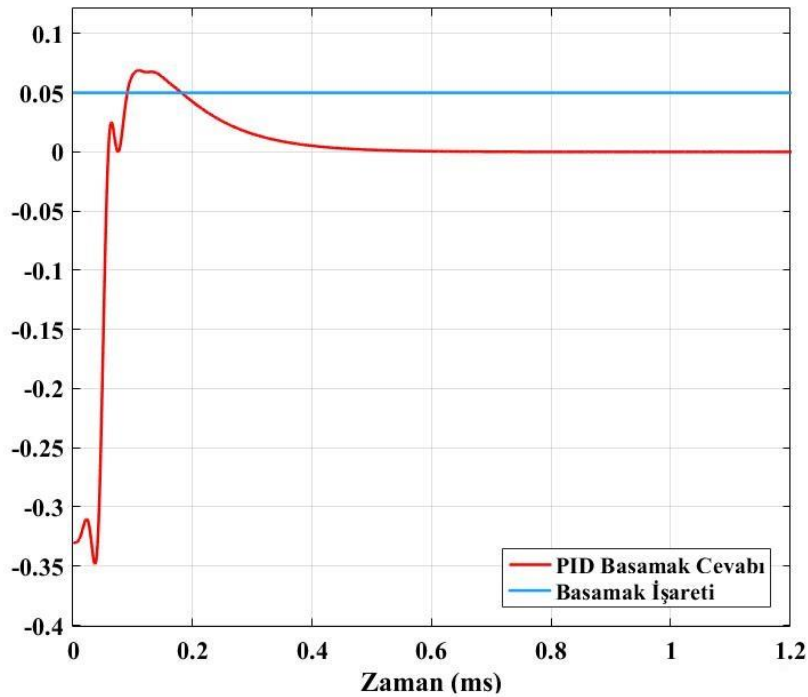
Şekil 6. Jiroskop Sisteminin Basamaklı Değişen Açısal Hız Takibi



Şekil 7. Jiroskop Sisteminin Basamaklı ve Rampa Değişen Açısal Hız Takibi

Yapılan analizler sonucunda tasarlanan kapalı döngü fiberoptik jiroskop düzeneğinin ani açısal hız değişimlerine hızlı cevap verdiği söylenebilir. Örneğin, Şekil 7'de 16. ms' de oluşan 0.4 rad/s ani açısal hız değişiminde yaklaşık 0.7 ms' lik ve 20. ms' de oluşan 1.1 rad/s ani açısal hız değişiminde ise yaklaşık 0.8 ms takip süresiyle sistemin hızlı cevap verdiği açıkça görülmektedir. Açısal hızın rampa veya basamak değişken farklı dönüş hızları için sistemin doğrusal ilişkili yüksek hassasiyetli çıkış işareti ürettiği Şekil 6 ve 7' de gösterilmiştir.

Kontrol sistemlerinin performansını belirlemede bir diğer önemli ölçüt ise sistemin basamak cevabıdır. Maksimum aşım ve yerleşme zamanı basamak cevabının başlıca kriterleridir. Şekil 8' de KDFOJ sistemi için tasarlanan PID kontrolcünün, sistem girişine uygulanan 0.05 rad/s'lık basamak işaretine karşılık elde edilen cevabı görülmektedir. Tasarlanan PID kontrolcünün maksimum aşım miktarı 0.069 birim genlik değerindedir. Yerleşme zamanı ise yaklaşık 0.5 ms olarak ölçülmüştür.



Şekil 8. PID Kontrolcünün Basamak Cevabı

4. Sonuç

Bu makalede kapalı döngü bir fiberoptik jiroskop sistemi tasarlanmış ve sistemin geri besleme döngüsü PID kontrolcü tarafından kontrol edilmiştir. PID kontrolcünün K_p , K_i ve K_d katsayılarını belirlemek için yerçekimi arama algoritmasından faydalanılmıştır.

İterasyon sayısının belirlenmesinden sonra basamaklı açısız hız değişimlerine karşı sistemin geri besleme kolunda meydana gelen hata işareti incelenmiştir. 0.05 rad/s' lik basamaklı açısız hız değişiminin neden olduğu hata işareti yaklaşık 1ms' de sıfır faz dengesine gelmektedir. Sistemden ölçülen açısız hızın, sisteme uygulanan açısız hızı başarıyla takip ettiği görülmektedir. Zero-bias testi için sıfır dönme (durağan) durumunda sistemin çıkış işareti gürültü düzeyinin $8.8 \cdot 10^{-6}$ rad/s ve altında olduğu tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda PID ile kontrol edilen jiroskopun, 1ms' nin altında bir cevap süresinde ve 10^{-5} rad/s ölçüm hassasiyetinde açısız hızın ölçülebileceğini göstermiştir.

Referanslar

- Alavi, M. M. R., Cavdar, T., Aghjehkand, V. F. (2012). Particle Swarm Optimization - Based Determination of Ziegler-Nichols Parameters for PID Controller of Brushless DC Motors. IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, Trabzon, Turkey. doi: 10.1109/INISTA.2012.6246984
- Azman, A. A., Rahiman, M. H. F., Mohammad, N. N., Marzaki, M. H., Taib, M. N., Ali M. F. (2017). Modeling and Comparative Study of PID Ziegler Nichols (ZN) and Cohen-Coon (CC) Tuning Method for Multi-Tube Aluminum Sulphate Water Filter (MTAS). Proc. of the 2017 IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems. doi: 10.1109/I2CACIS.2017.8239027
- Hambali, N., Masngut, A., Ishak, A. A., Janin, Z. (2014). Process Controllability for Flow Control System Using Ziegler-Nichols (ZN), Cohen-Coon (CC) and Chien-Hrones-Reswick (CHR) Tuning Methods. Proc. of the 2014 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA). doi: 10.1109/ICSIMA.2014.7047432
- Harish Babu, G., Venkata Anuhya A., Venkatram, N. (2016). Digital Signal Processing Scheme for Open Loop and Closed Loop IFOG using MATLAB/SIMULINK. Indian Journal of Science and Technology, 9(11),1-10. doi: 10.17485/ijst/2016/v9i11/86935
- Hotate, K., Harumoto, M. (1997). Resonator Fiber Optic Gyro Using Digital Serrodyne Modulation. Journal of Lightwave Technology, 15(3), 466-473. doi: 10.1109/50.557562
- Howe, E. W., Savet, P. H. (1964). The Dynamically Tuned Free Rotor Gyro. Control Engineering, 11(6), 67-72.
- Jin, Z., Yu, X., Ma, H. (2013). Closed-Loop Resonant Fiber Optic Gyro with An Improved Digital Serrodyne Modulation. Optical Society of America, 21(22), 26578-26588. doi: 10.1364/OE.21.026578
- López-Higuera J. M. (2002), Handbook of Optical Fibre Sensing Technology, Chippenham, Wiltshire, UK., John Wiley & Sons Ltd.
- Meshram, P. M., Kanojiya, G. (2012). Tuning of PID Controller using Ziegler-Nichols Method for Speed Control of DC Motor. International Conference on Advances in Engineering, Science and Management, ICAESM -2012.
- Navruz, I., Ari, F., Şerbetçi, H. (2017). Design and Analysis of a Closed-Loop Fiberoptic Gyroscope. I. International Scientific and Vocational Studies Congress-2017, Turkey, 480-485.
- Pérez, R. J., Álvarez, I., Enguita J. M. (2016). Theoretical Design of a Depolarized Interferometric Fiber-Optic Gyroscope (IFOG) on SMF-28 Single-Mode Standard Optical Fiber Based on Closed-Loop Sinusoidal Phase Modulation with Serrodyne Feedback Phase Modulation Using Simulation Tools for Tactical and Industrial Grade Applications. Sensors, 16(5), 1-19. doi: 10.3390/s16050606
- Piyabongkarn, D., Rajamani, R., Greminger, M. (2005). The Development of a MEMS Gyroscope for Absolute Angle Measurement. IEEE Trans. Cont. Syst. Tech., 13(2): 185-195. doi:10.1109/TCST.2004.839568
- Pogorelaya, D. A., Smolovik, M. A., Volkovskiy, S. A., Mikheev, M. A., Aleynik, A. S., Strigalev, V. E. (2017). Adjustment of PID Controller in Fiber-Optic Gyro Feedback Loop. Gyroscopy and Navigation, 8(3), 235-239.
- Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H., Saryazdi, S., (2009). A Gravitational Search Algorithm. Information Science, 179(13), 2232-2248. doi: 10.1016/j.ins.2009.03.004
- Rosenthal, A. H. (1962). Regenerative Circulatory Multiple-Beam Interferometry for the Study of Light Propagation Effects. J. Opt. Soc. Am., 52(10), 1143-1147. doi:10.1364/JOSA.52.001143
- Sagnac, G. (1913). L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme. Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, 95, 708-710.
- Sun, Q. D., Zhu, Z. H., Larouche, B. P. (2013). FPGA-Based Hardware Design of Closed Loop Control for Fiber Optic Gyroscope. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 51(1), 121-128.
- Vali, V., Shorthill, R. W. (1976), Fiber Ring Interferometer, Appl. Opt., 15(5):1099-1100. doi:10.1364/AO.15.001099



Porselen Karo Üretimlerinde Konya Kili Kullanımı

Use of Konya Clay for Porcelain Tile Productions

Müge Tarhan¹

Uşak Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Seramik Bölümü, Ankara İzmir Yolu 8. km Bir Eylül Kampüsü, 64200 Uşak, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 22/04/2019

Kabul/Accepted: 08/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Porselen karolar düşük su emme, üstün mekanik ve de estetik özelliklerinden dolayı seramik kaplama malzemelerinde ilk sırada tercih edilen ürünler arasında yer almaktadır. Bu ürünlerin üretimlerinde düşük oranda demir içermesi ve yüksek plastiklik özelliğinden dolayı Ukrayna killeri kullanılmaktadır. Ukrayna kilinin ithal edilen bir hammadde olması ve her yıl fiyatının giderek artması nedeniyle porselen karo üretim maliyetleri de buna paralel olarak artmaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde yerel hammaddelerin kullanılması şirketlere önemli bir maliyet avantajı sağlayacaktır. Çalışmada porselen karo bünye kompozisyonlarında Konya kilinin Ukrayna kili yerine kullanımı araştırılmış ve bünye teknik özellikleri üzerine olan etkileri belirlenmiştir. Standart porselen karo bünye kompozisyonunda kullanılmakta olan Ukrayna kili kademeli olarak azaltılmış yerine Konya kili ilave edilerek yeni bünye reçeteleri geliştirilmiştir. Geliştirilen bünyeler Uşak Seramik endüstriyel fırınlarında 1210°C'de 52 dakikada pişirilmiştir. Bünyelerin tüm fiziksel ve optik özellikleri incelenmiştir. Sinterleme davranışları optik dilatometre cihazı ile incelenmiş, ısıl genleşme katsayıları dilatometre cihazı ile ölçülmüştür. Bünyelerde gelişen fazlar XRD analizi ile belirlenmiş, mikroyapı incelemeleri taramalı elektron mikroskopu ile yapılmıştır. Sonuçlara göre bünyelerde Ukrayna kili yerine Konya kili kullanımı bünyelerin kuru mukavemet değerlerini, su emme ve pişme küçülme değerlerini arttırmaktadır. Sonuç olarak porselen karo bünyelerinde bünye kompozisyonunda bazı optimizasyonların da yapılmasıyla Ukrayna kilinin yerine Konya kili kullanımının uygun olacağı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Porselen karo, Konya kili, Ukrayna kili”

Abstract

Porcelain tiles are the most preferred products in ceramic tiles due to their low water absorption, superior mechanical and aesthetic properties. Ukrainian clays are used in the production of these products because of their low iron content and high plasticity, The Ukrainian clay is an imported raw material and its price increases every year, and so it increases the cost of the production of porcelain tiles. In this respect, the use of local raw materials will provide a significant cost advantage to ceramic companies. In the study, the use of Konya clay instead of Ukrainian clay was investigated in porcelain tile body compositions and the effects on the technical properties of the bodies were determined. For this purpose; Ukrainian clay was gradually removed and Konya clay were added to the standard porcelain tile composition of Usak Ceramic. The developed bodies were fired in Usak Ceramics industrial roller kilns at 1210 ° C for 52 minutes. All physical and optical properties of the bodies were examined. Sintering behaviors were examined by optical dilatometer and thermal expansion coefficients were measured by dilatometer. The phases developed in the body were determined by XRD analysis and microstructure investigations were made by scanning electron microscopy. According to the results, the use of Konya clay instead of Ukrainian clay in the body increases the dry strength values, water absorption and firing shrinkage values of the bodies. As a result, it was determined that the use of Konya clay would be possible with some optimizations in the composition of porcelain tiles.

Key Words

“Porcelain tile, Konya clay, Ukrainian Clay”

1. Giriş

Seramik kaplama malzemeleri duvar karosu, yer karosu ve porselen karo olmak üzere temel olarak üç guruba ayrılmaktadır. Porselen karolar düşük su emme (<%0,5), kimyasal dayanım, dona dayanım ve yüksek mekanik özelliklerinin yanı sıra sahip oldukları üstün estetik özellikleri bu ürünlerin hem iç hem de dış mekanlarda yer ve duvar kaplaması olarak kullanılmasını sağlamaktadır (Biffi 1999, Sanchez ve ark. 2001, Martin-Marquez ve ark. 2008, Zanelli ve ark. 2008 Tarhan 2010, Tarhan ve ark. 2017). Porselen karo üretimlerinde kullanılan hammaddeler plastik özelliğe sahip olanlar ve plastik özelliğe sahip olmayanlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Plastik özelliğe sahip olan hammaddeler killeri, diğerleri ise feldispat ve kuvarstır. Porselen karo bünye kompozisyonları genel olarak % 25-40 plastik kil, %0-15 kaolen, % 40-50 feldispat ve % 10-15 kuvars hammaddelerinden oluşmaktadır. Killer şekillendirmede kolaylık sağlamak ve ürünlerin yaş ve kuru mukavemetini arttırmak için kullanılırken, ergitici olarak kullanılan feldispatlar bünyelerin sinterlenmesini sağlayarak porselen bünyelere istenilen düşük poroziteli mikroyapısını kazandırır. Farklı kil minerallerinin, ergiticilerin ve kuvarsın miktarı, killerin mineralojik yapısına, tane boyut dağılımına ve ergiticilerle olan etkileşimlerine bağlı olarak değişmektedir (Villegas-Palacio ve Dinger,1996, Carty ve Senapati 1998, Tarhan 2010) . Son yıllarda üretim teknolojisinde meydana gelen gelişmelerle 60x120 cm, 100x100 cm, 120x120 cm gibi büyük ebatlara doğru kaymaktadır. Seramik kaplama malzemelerinden porselen karo bünyelerinde üretilen karo boyutlarının gün geçtikçe artması, büyük ebatla yapılan bu ürünlerin özellikle aplikasyondan pişirime olan süreçte yüksek kuru mukavemete sahip olmalarını gerektirmektedir. Bünye reçetelerinde yaş plastik özelliğinden dolayı kuru mukavemet üzerinde etkin olan hammadde killerdir. Porselen karo üretimlerinin özellikle büyük ebatlara doğru kayması bünye kompozisyonlarında yüksek plastiklikte killerin kullanımını zorunlu hale gerektirmektedir. Bunu yanı sıra sır aplikasyonu olmadan da üretilebilen porselen karo bünyelerinin pişme renginin estetik gereksinimlerden dolayı beyaz olması beklenir. Bünye renginin beyazlığı bünye kompozisyonlarında kullanılan hammaddelerde bulunan Fe₂O₃ ve TiO₂ oranına bağlı olarak değişmektedir. Fe₂O₃ ve TiO₂ diğer hammaddelere kıyasla en çok kil hammaddesinden gelmekle birlikte miktarının fazla olması bünye renginin koyulaşmasına neden olmaktadır. (Rado 1969, Worrall 1982, Vari 2000, Bonnet and Gaillard 2007, Cengiz 2011). Bu nedenle bu bünyelerde yüksek plastiklik ve beyazlık özellikleri ile Ukrayna killeri kullanılmaktadır. İthal edilen bu killeri oldukça pahalı olup reçete maliyetlerini de önemli ölçüde arttırmaktadır.

Ülkemizde seramik karo üreticileri seramik kili açısından Türkiye'nin 2 büyük bölgesi olan İstanbul (Şile ve Kemerburgaz) ve Söğüt bölgesinden kil temin etmektedir. Bu bölgelerin dışında seramik sektörünün en önemli üreticilerine yakınlık bakımından ikinci derecede önemli kil potansiyeli olan bölgeler Çanakkale, Manisa, Kütahya, Afyon ve Konya'dır. Konya'nın Doğanhisar bölgesinde ekonomik öneme sahip killeri Ayaslar ve Doğanhisar formasyonu içerisinde yer almaktadır. Konya-Doğanhisar'da 900 bin ton rezervli bir seramik kil yatağı işletilmektedir (Bayram 2012) . Doğanhisar bölgesindeki killerin kullanımı yönünde yapılan çalışmalar incelendiğinde; tuğla, kiremit, seramik karo, çanak ve çömlek üretimi için uygun olabileceği belirlenmiştir. Bu çalışmada porselen karo bünyelerinde Konya-Doğanhisar kilinin Ukrayna kili yerine kullanımı ve bünye teknik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Çalışmada; Uşak Seramik firmasının standart porselen karo bünye reçetesinde kullanılan Ukrayna kili kademel olarak azaltılmış ve yerine Konya kili ilave edilmiştir. Bu şekilde geliştirilen porselen karo bünyelerinin teknik özellikleri incelenerek Konya kilinin porselen karo bünyelerinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Kullanılan Hammaddeler

Bünye geliştirme çalışmalarında 2 farklı tip kil, kaolen, sodyum feldispat, bentonit ve Konya kili kullanılmıştır. Kullanılan hammaddeler ve Konya-Doğanhisar bölgesinden temin edilen Konya kilinin kimyasal bileşimleri Çizelge 1'de verilmiştir. Ukrayna kili ve Konya kilinin fiziksel pişme küçülme (%), su emme (%) ve renk değerleri Çizelge 2'deki fiziksel özellikler tablosunda verilmektedir.

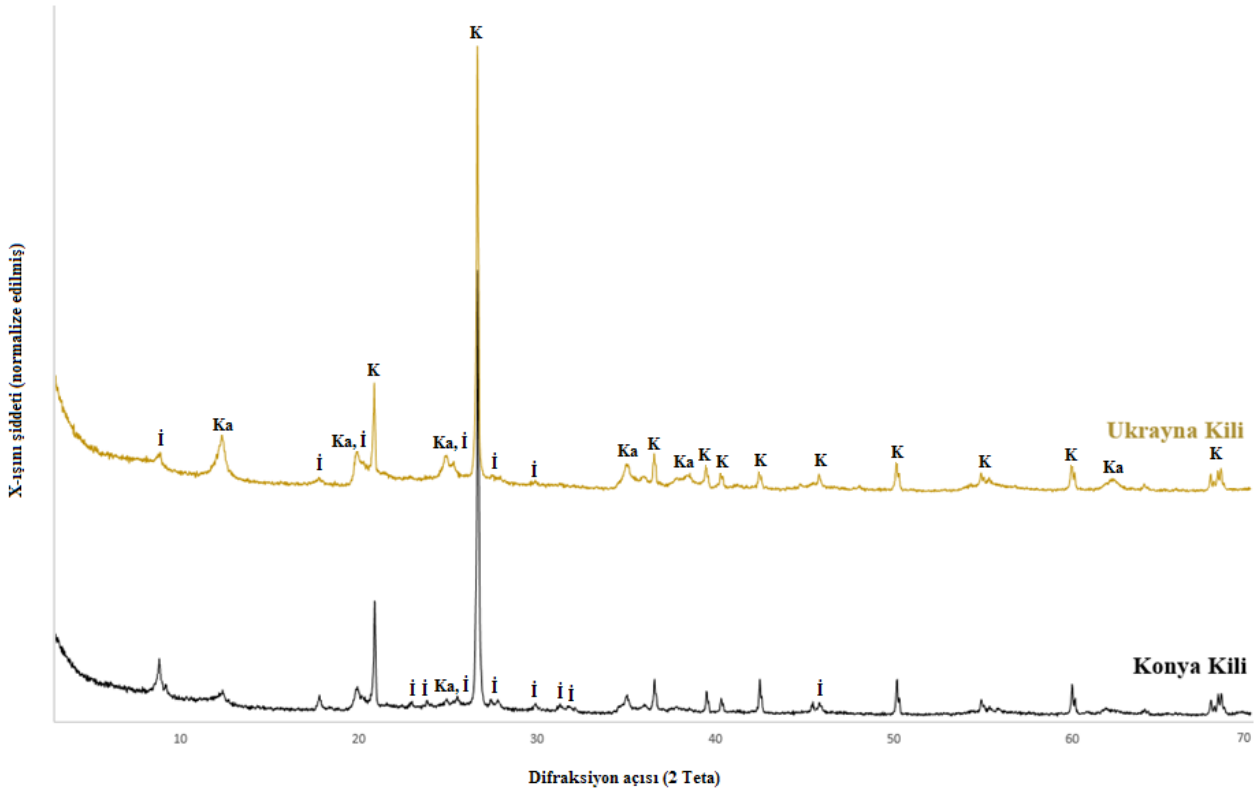
Çizelge 1. Geliştirilen porselen karo bünyelerinde kullanılan hammaddelerin kimyasal bileşimleri (% ağı.)

Hammaddeler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	A.Z.
Ukrayna Kili	59,26	26,56	0,99	1,34	0,64	0,36	0,82	2,02	8,01
İstanbul Kili	62,24	22,64	2,81	1,22	0,22	0,44	1,28	2,04	7,11
Kaolen	69,14	20,77	0,62	0,74	0,23	0,06	0,17	0,28	7,99
Sodyum Feldispat	69,89	18,55	0,15	0,24	0,47	0,20	9,77	0,40	0,33
Bentonit	70,95	12,32	0,65	0,05	1,12	1,25	0,03	0,23	13,40
Konya Kili	64,43	22,79	1,31	1,04	0,30	0,50	0,44	2,36	6,73

Çizelge 2. Ukrayna kili ve Konya kilinin fiziksel özellikleri (% ağırlık)

	Ukrayna Kili	Konya Kili
Kuru Mukavemet (kg/cm²)	46,32	50,28
Pişme Küçülmesi (%)	7,38	5,71
Su Emme (%)	2,08	7,40
L*	72,74	73,85
a*	3,95	0,08
b*	18,69	18,63
Isıl Genleşme Katsayısı (10⁻⁷ °C⁻¹) (20-400°C)	61,72	67,07

Konya kili ve Ukrayna kilinin XRD grafikleri Şekil 1’de verilmiştir. Kuvars, illit ve kaolinit fazları her iki kilde de tespit edilmiştir. Dikkati çeken en büyük fark killerin içerdikleri faz miktarlarıdır. Ukrayna kili daha fazla miktarda kaolinit fazı içerirken, Konya kili ise daha fazla miktarda illit fazı içermektedir. İllit kil mineralleri içerisinde en yaygın olan minerallerden biridir. Killerin yapısında bulunan illit fazı killerin mukavemetini arttırmaktadır (Anonim (2000a), Tarhan ve Tarhan 2019). Ukrayna kili ve Konya kilinin kuru mukavemet değerleri incelendiğinde (Çizelge 2) yapılan XRD analizini doğrular nitelikte Konya kilinin Ukrayna kilinden daha yüksek kuru mukavemet değerine sahip olduğu görülmektedir. Bunun dışında killerin kuvars fazlarına ait pikler karşılaştırıldığında Ukrayna kilinin Konya kiline göre daha az miktarda kuvars fazı içerdiği görülmektedir. Ukrayna kilinin Konya kiline göre daha düşük ısıl genleşme katsayısına sahip olması da doğrudan bununla ilişkilidir. Çünkü kristal yapıdaki kuvarsın ısıl genleşme katsayısı oldukça yüksektir (Kingery ve ark. 1976, Eppler and Eppler 2000, Tarhan ve Tarhan 2019).

**Şekil 1.** Ukrayna kili ve Konya kiline ait XRD analizleri (K: Kuartz, İ: İllite, Ka: Kaolinit)

2.2. Bünye Geliştirme Çalışmaları

Geliştirilen bünye kompozisyonlarında standart porselen bünye kompozisyonundan yola çıkılarak kullanılan Ukrayna kili azaltılmış yerine Konya kili kademeli olarak ilave edilmiştir. Standart porselen bünye reçetesi ile Konya kili ile geliştirilen bünye reçeteleri Çizelge 3’te verilmiştir.

Hammaddeler geliştirilen reçete oranlarına göre ve rutubet değerleri de dikkate alınarak tartılmıştır. Elde edilen hammadde karışımları laboratuvar tipi bilyalı değirmenlerde 45 µm elek üstü bakiyesi % 2-2,5 gelene kadar öğütülmüştür. Öğütme işlemi hammadde karışımlarına % 0,8 sodyum silikat ve çamur yoğunluğu 1670 g/lt. olacak şekilde su ilavesi ile birlikte yapılmıştır. Öğütme işlemi sonrası çamurların yoğunluk (g/lt) ve elek bakiye (+45 µm) değerleri ölçülmüş ve ardından etüvde 110°C sıcaklıkta kurutulmuştur. Daha sonra kurutulmuş çamurlar öğütülerek ve %5-6 oranında nemlendirilerek toz granüller haline getirilmiştir. Nemin homojen olarak dağılmasının sağlanması amacıyla granüller bir gün boyunca bekletilmiş ve ardından 50x100 mm boyutlarında 400 kg/cm² basınçla preslenerek şekillendirilmiştir. Hazırlanan numuneler 110°C’de laboratuvar tipi

etüvide 1 saat süre ile kurutulmuştur. Kurutulan numune karoların pişirimleri Uşak Seramik Fabrikası'nda porselen karo pişirim koşullarına göre 1210°C'de 52 dak. lık pişirim süresinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3. Porselen karo bünye reçete kompozisyonları (% ağı.)

	Std	K1	K2	K3	K4
Ukrayna Kili	12	9	6	3	-
İstanbul Kili	18	18	18	18	18
Kaolen	16	16	16	16	16
Bentonit	2	2	2	2	2
Sodyum Feldispat	52	52	52	52	52
Konya Kili	-	3	6	9	12

2.3. Karakterizasyon

Çalışmada geliştirilen bünyelerin tüm fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Bu kapsamda bünyelerin kuru mukavemet, % pişme küçülmesi, % su emme testleri yapılmış, standart bünye değerleri ile karşılaştırılmalı olarak TS EN 14411 (Grup BIa, E< %0,5) standart test serisine göre değerlendirilmiştir. Numunelerin kuru eğilme mukavemeti testleri 3 noktalı eğme testi kullanılarak, su emme değerleri ISO 10545-3 vakumlu su emme test standardına göre yapılmıştır. Fiziksel testler için 5 numune ölçümünün ortalama değerleri alınmış ve standart sapma $\pm 1.5\%$ olacak şekilde değerlendirilmiştir. Pişmiş numunelerin renk ölçümü (L*,a,b) Minolta Konica model renk ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Bünye kompozisyonlarında kullanılan hammaddelerin kimyasal analizleri Rigaku NEX OC+ EZ marka ve model X- ışını floresans spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir. Fiziksel test sonuçlarının değerlendirilmesine göre belirlenen bünye ile standart porselen karo bünyesinin sinterleme davranışları Misura ODHT HSM 1600/80 marka ve modeldeki optik dilatometre cihazı ile incelenmiştir. Ukrayna kili ve Konya kili ile pişirim sonrasında bünyelerde oluşan kristal fazların analizi XRD yöntemi ile tespit edilmiştir. XRD ölçümleri PANalytical X' Pert Pro MPD marka XRD cihazı ile yapılmıştır. Bünyelerin ısıl genişleme katsayısı değerleri dilatometre cihazı (Netzch 402 PC) ile ölçülmüştür. Bünyelerin mikroyapı görüntülerini elde etmek için numunelerin parlatılmış yüzeyleri incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri Phenom marka taramalı elektron mikroskopuyla yapılmıştır. Mikroyapı çalışmalarında; atom ağırlığına bağlı olarak faz ayrışımını sağlayan geri yansıyan elektronlarla (BEI) görüntüleme tekniği kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Fiziksel ve Optik Özellikler

Standart porselen karo bünyesi ve Konya kili kullanılarak geliştirilen bünyelerin fiziksel özellikleri Çizelge 4'te verilmiştir. Sonuçlara göre Konya kili ilavesi ile geliştirilen bünyelerin kuru mukavemet değerlerinde belirgin bir artışın olduğu tespit edilmiştir. Ukrayna kili ve Konya kiline fiziksel test sonuçları (Çizelge 2) ve XRD analizi (Şekil 1) incelendiğinde Konya kilinin Ukrayna kiline göre daha yüksek oranda illit minerali içerdiği ve kuru mukavemet değerinin de daha yüksek olduğu görülmektedir. Killerin yapısında bulunan illit fazı killerin plastikliğini artırarak kuru mukavemetini arttırmaktadır (Anonim (2000a), Tarhan ve Tarhan 2019). Bu nedenle geliştirilen bünyelerde Konya kilinin artması ile birlikte kuru mukavemet değerleri benzer şekilde artmıştır.

Porselen bünyelerinde Ukrayna kili yerine Konya kili kullanılması düşük oranlarda bünyelerin su emme değerini çok etkilememiştir. Ancak Konya kili oranı % 9'un üzerine çıktığında bünyenin su emmesi belirgin şekilde artmış ve fabrika standartları (su emme < %0,1) üzerinde bir su emme değeri elde edilmiştir. Çizelge 2'de verilen killerin fiziksel özellikleri incelendiğinde Konya kilinin su emme değerinin Ukrayna kiline göre çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle bünye kompozisyonlarında artan Konya kili miktarı ile su emme değeri artmıştır. Konya kilinin düşük oranlarda (<%9) kullanıldığı bünyelerde su emme değerinin belirgin bir artış göstermemesi ise bünyenin geniş bir ergime aralığına sahip olması ile açıklanabilir. Bunun yanı sıra bünyelerde Konya kili kullanımı bünyelerin pişme küçülme değerini arttırmıştır. Ancak yine artan Konya kili oranlarında (>%9) su emmedeki artış ile birlikte pişme küçülme değerinde gözlenen azalma yüksek oranlarda Konya kili kullanımının bünyelerin sinterlenmesini zorlaştırdığını göstermektedir.

Bünyelerin beyazlık (L*) değerleri incelendiğinde, Ukrayna kilinin azaltılması ve Konya kilinin artmasıyla beyazlık değerlerinde bir miktar artış tespit edilmiştir. Özellikle Ukrayna kilinin bünye reçetesinden tamamen çıkarıldığı yerine Konya kilinin kullanıldığı K4 kodlu bünyenin beyazlık değerindeki artış dikkat çekicidir. Bunun nedeni Ukrayna kiline göre daha yüksek beyazlık değerine sahip olan Konya kilinin kullanılmış olmasının yanı sıra Ukrayna kili yerine tamamen Konya kili kullanılmış bünyenin daha az sinterlenmiş olmasıdır. Porselen bünyelerde sinterlemenin artması ve su emmenin düşmesiyle birlikte bünyelerde artan camsı faz nedeniyle beyazlık değeri düşmektedir (Tarhan 2010).

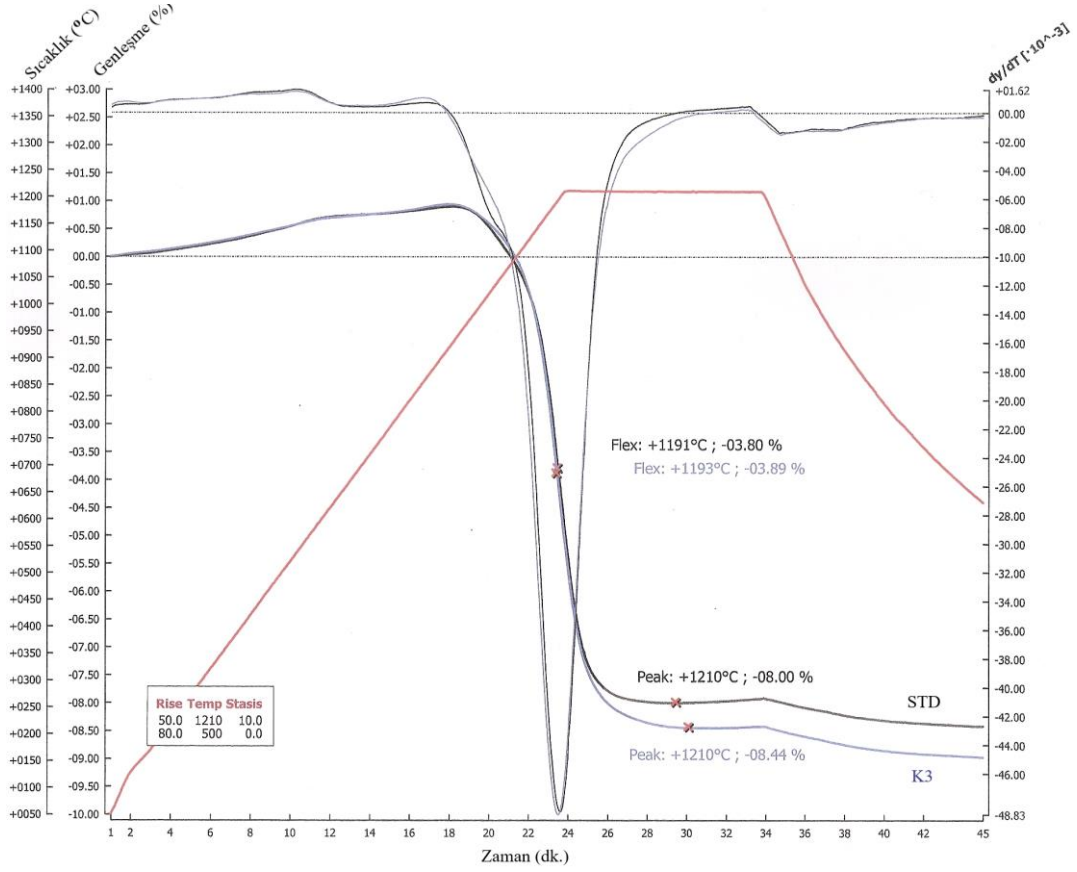
Çizelge 4. Çalışılan bünyelerin fiziksel ve ısıl özellikleri

	Std	K1	K2	K3	K4
Kuru mukavemet (kg/cm²)	20,42	20,62	21,07	22,26	22,80
Pişme Küçülmesi (%)	7,94	7,95	8,14	8,34	8,08
Su Emme (%)	0,00	0,04	0,05	0,09	0,21
L*	73,53	73,49	73,71	73,87	74,33
a*	1,56	1,9	1,7	1,86	1,85
b*	8,41	8,51	8,58	8,69	8,94
Isıl Genleşme Katsayısı (10⁻⁷°C⁻¹) (20-400°C)	72,99	73,04	73,33	73,51	74,46

Porselen karo bünyelerinde ısıl genleşme katsayısı artan Konya kili miktarı ile birlikte artmaktadır. Konya kili Ukrayna kiline göre daha yüksek oranda SiO₂ içermekte ve Ukrayna kiline göre daha yüksek ısıl genleşme katsayısı değerine sahiptir. (Çizelge 1, Şekil 1 ve Çizelge 2). Bu Konya kilinin Ukrayna kiline göre daha fazla miktarda kuvars fazına sahip olması ile açıklanabilir. Çünkü kristal yapıdaki kuvarsın ısıl genleşme katsayısı amorf yapıdaki kuvarstan oldukça yüksektir (Kingery ve ark. 1976, Eppler and Eppler 2000). Bundan dolayı bünyelerde artan Konya kili oranıyla birlikte ısıl genleşme katsayısı değeri de artmaktadır.

3.2. Pişirim Davranışı

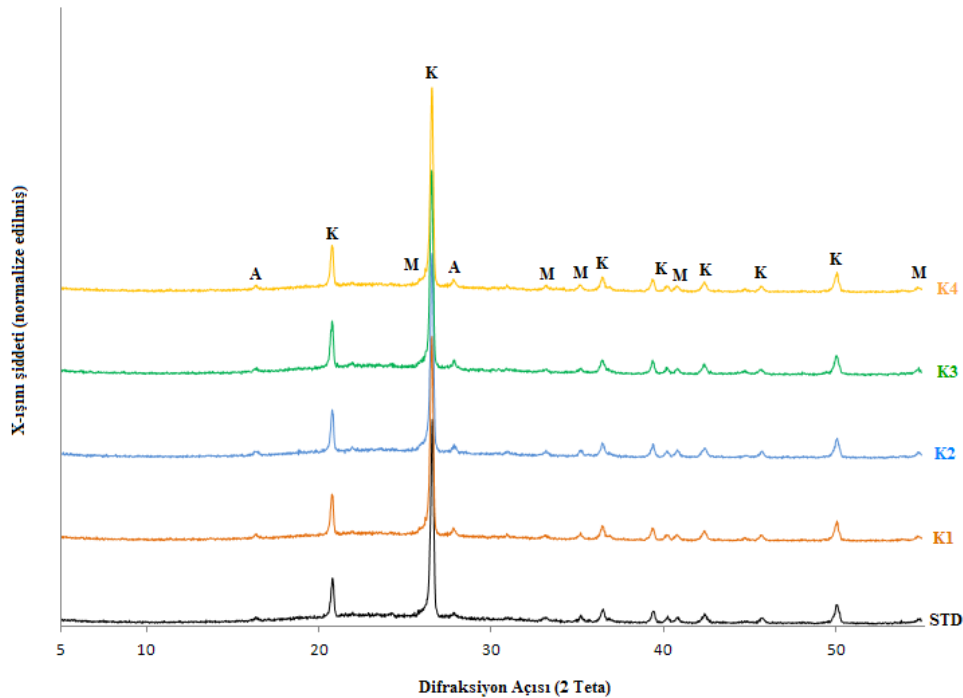
Konya kili kullanılarak yapılan bünye geliştirme çalışmalarında; standart bünye teknik özelliklerine en yakın olarak en yüksek oranda Konya kili kullanılacak reçete % 9 oranında Konya kilinin kullanıldığı K3 bünyesidir. Bu nedenle porselen karo bünyelerinde Konya kilinin sinterlenme davranışına etkisini belirlemek için standart bünye ile % 9 oranında Konya kili kullanılan K3 bünyesinin sinterlenme davranışları incelenmiştir. İlk olarak bünyeler için sinterlemenin en hızlı olduğu sıcaklık değeri tespit edilmiş ve bu sıcaklık değeri (1210°C) tepe sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Sinterleme davranışlarının incelenmesi için olarak öncelikle 80°C/dk ile 500°C'ye çıkılmış ardından 50°C/dk ile 1210°C'ye çıkılarak ve tepe sıcaklığında 10 dk beklenmiştir. Şekil 2'de verilen sinterleme eğrileri zamana karşı bünyenin küçülme davranışı ve artan sıcaklık ilse sinterleme oranını göstermektedir. Her iki bünyenin de 1210°C'de ve 10 dk.lık bekleme süresinde lineer küçülmesi durmuştur. K3 bünyesi bu sıcaklık ve sürede hiçbir deformasyona uğramadan küçülme davranışı gösterirken, standart bünye uygulanan bekleme süresinde yaklaşık 5. dakikadan sonra hafif bir genleşme göstermeye başlamıştır. Bu durum uygulanan sıcaklık ve/veya sürenin standart bünye için fazla pişmeye neden olduğunu göstermektedir. Bu nedenle K3 bünyesinin standart bünyeye göre sinterlenmesinin daha yüksek sıcaklık ve/veya daha uzun süre gerektirdiği söylenilebilir. Bu da porselen karo bünyelerinde Ukrayna kili oranının azalması ve Konya kili kullanımı ile birlikte bünyelerin sinterleme sıcaklık ve/veya süresinin arttığını göstermektedir. Çizelge 4'te verilen Konya kili kullanımındaki artışla birlikte su emme değerlerindeki artış da bu sonucu doğrular niteliktedir. Bunun yanı sıra Şekil 2'de verilen optik dilatometre eğrileri incelendiğinde Konya kili kullanımı ile bünye küçülme değerinin arttığı görülmektedir. Bu da yine Çizelge 4'te verilen pişme küçülmesi verilerini doğrular niteliktedir.



Şekil 2. Standart ve K3 kodlu porselen karo bünyelerine ait dilatometre eğrileri.

3.3. Faz Analizi

Standart bünye ile Konya kili kullanılarak geliştirilen porselen karo bünyelerinin XRD analiz sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre tüm bünyeler birbirlerine benzer şekilde kuvars, müllit ve kalıntı albit fazlarını içermektedir. Müllit fazı, porselen bünyelerin sinterlenme sürecinde bünye kompozisyonlarında bulunan kil minerallerinden gelişir. Porselen karo bünyelerinde kısa pişirim sürelerinden dolayı albit fazının bir kısmı camsız faz içerisinde ergimeden kalmaktadır. Bu nedenle albit fazı kalıntı faz olarak mikroyapıda bulunmaktadır (Manfredini ve ark. 1995, Iqbal ve ark. 2000, Esposito ve ark. 2005, Carbalal ve ark. 2007, Tarhan 2010). Ana faz olarak yapıda bulunan kuvars da yine albit fazı gibi kalıntı bir fazdır. Çizelge 1 ve Şekil 1'de verilen Ukrayna kili ve Konya kilinin kimyasal ve XRD analizlerine göre Konya kili Ukrayna kiline göre daha yüksek oranda kuvars içermektedir. Bu nedenle bünyelerde artan Konya kili miktarı ile birlikte bulunan kalıntı kuvars pik şiddetinin de artması beklenmiştir. Ancak yapılan XRD analizlerinde çok belirgin bir fark gözlemlenmemiştir.

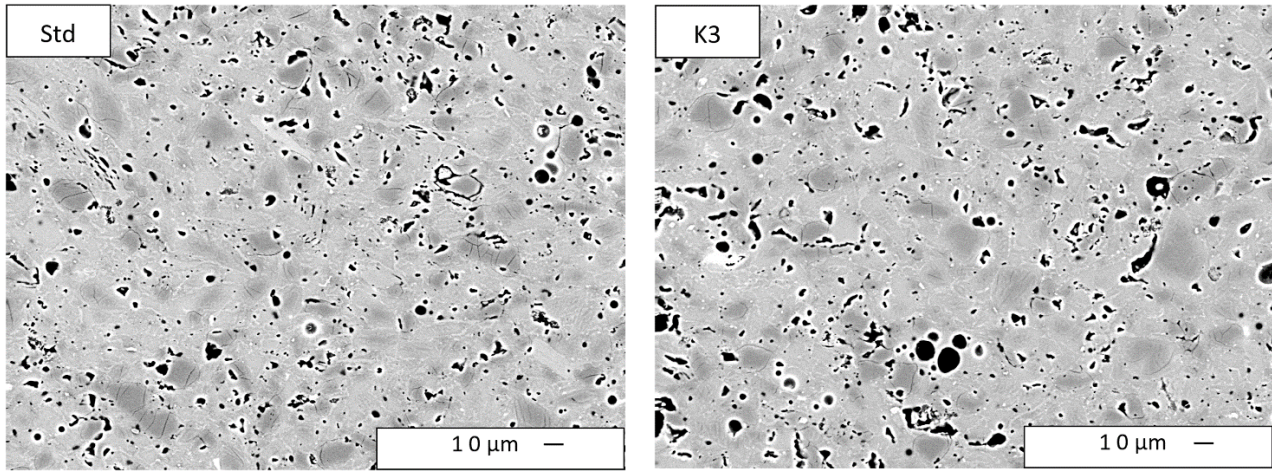


Şekil 3. Geliştirilen porselen bünyelere ait XRD analizleri (A: Albit, K: Kuvars, M: Müllit)

3.4. Mikroyapı Analizi

Standart bünye ve K3 kodlu bünyeye ait numunelerin parlatılmış yüzeylerinden alınan geri yansıyan elektron görüntüleri Şekil 4'te verilmiştir. Geri yansıyan elektron görüntülerinde ağır elementler diğer elementlere göre daha beyaz görünmektedir. Mikroyapı görüntülerinde koyu gri ton ile görülen kısımlar kuvars tanelerini, açık gri-beyaz gibi görülen kısımlar müllit kristallerini ve siyah renkli kısımlar da poroziteleri göstermektedir. Standart ve K3 bünyelerinin birbirlerine oldukça benzer şekilde düzensiz şekilli kuvars kristalleri, müllit kristalleri ve porları içerdiği görülmektedir. Porselen karo bünyelerinin sinterleme sürecinde kuvarsın bir kısmı camsı fazın içinde çözünürken, bir kısmı çözünmeden kalıntı kuvars olarak bünye mikroyapısında kalır. Sinterlemenin son aşamasında $\alpha \rightarrow \beta$ kuvars dönüşümünden dolayı kuvars tanelerinin içerisinde ve etrafında çevresel çatlaklar oluşmaktadır (Tarhan 2010, Tarhan 2019). Her iki bünye mikroyapısında da kalıntı kuvars taneleri ile kuvars taneleri içerisinde ve çevresinde oluşan mikroçatlaklar gözlenmektedir.

Porselen bünyelerde sinterleme sırasında oluşan camsı faz viskoz akışla porları doldurularak yoğunlaşmayı sağlar. Bu sayede boyut sınırlarına göre porlar elimine edilirler (Amoros ve ark. 2007, Tarhan 2010). Mikroyapı görüntülerinde dikkat çeken noktalardan biri az da olsa porların boyut ve miktarlarındaki farklılıktır. Porselen bünye kompozisyonunda Konya kili kullanımı ile birlikte por boyut ve miktarının biraz da olsa arttığı görülmektedir. Bu da porselen bünyelerde Ukrayna kili yerine Konya kili kullanımının bünyelerin sinterlenmesini zorlaştırmasını ve bünye su emme değerindeki artışı açıklamaktadır.



Şekil 4. Std ve K3 bünyelerinden alınmış geri yansıyan elektron görüntüsü.

4. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada Konya kilinin porselen karo bünyelerinde ithal bir kil olan Ukrayna kili yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ukrayna killeri porselen karo bünyelerinde, sahip oldukları yüksek plastiklik özellikleri ile bünyelerin kuru mukavemet değerini arttırmaları ve yüksek beyazlık değeri nedeni ile tercih edilmektedir. Özellikle son yıllarda porselen karo ürün ebatlarının giderek büyümesi ve dikdörtgen ebatlara doğru kayması ürünlerin yüksek kuru mukavemet değerlerine sahip olmalarını gerektirmektedir. Bu nedenle ithal edilen Ukrayna killerinin kullanımı neredeyse zorunlu hale gelmiştir. Yapılan çalışmada Ukrayna kilinin yerine kullanılabilirliği araştırılan Konya kilinin fiziksel özellikleri değerlendirildiğinde Ukrayna kiline bir alternatif olabileceği tespit edilmiştir. Porselen karo bünyelerinde Ukrayna kilinin azaltılarak yerine Konya kili kullanılması bünyelerin kuru mukavemet değerini arttırmaktadır. Bünye kompozisyonlarında özellikle Ukrayna kili yerine artan Konya kil miktarı (≥ 9) bünyelerin su emme ve pişme küçülme değerlerini de belirgin şekilde artırmıştır. Bununla birlikte bünyelerde Konya kili kullanımı bünyelerin deformasyon davranışını belirleyen ısıl genleşme katsayısı değerini de arttırmaktadır. Genel olarak elde edilen tüm teknik özellikler değerlendirildiğinde, porselen karo bünyelerinde Konya kilinin kullanılarak Ukrayna kil oranının azaltılması reçetede yapılacak bazı optimizasyonlarla mümkün olabilecektir. Ukrayna kili yerine Konya kili kullanılması halinde bünye kompozisyonları, su emme-pişme küçülme ve deformasyon değerlerini işletme standartlarında tutacak yönde optimize edilmelidir.

Teşekkür

Bu çalışmada desteklerinden dolayı Uşak Seramik San. A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Kaynaklar

Amoros, J.L., Orts, M.J., Garcia-Ten, J., Gozalbo, A. (2007), Sanchez, E., Effect of geen porous texture on porcelain tile properties. Jour. of Eur. Ceram. Soc., 27, 2295-2301.

Anonim (2002a), Applied ceramic technology, Volume I, SACMI IMOLA s.c. a r.l., Italy.

- Bayram, F. (2012), Doğanhisar İlçesi'nin kil başta olmak üzere maden türünden yeraltı kaynaklarının potansiyellerinin tespiti, T.C. Mevlana Ajansı Kalkınma Projesi, TR52-11-TD01/118, Konya.
- Biffi, G. (1999), Porcelain stoneware - production manual and methods of use, Gruppo Editoriale Faenza Editrice S.p.A., Faenza.
- Bonnet J.P. and Gaillard J.M. (2007), Ceramic Materials, Processes, Properties and Applications, Philippe Boch and Jean-Claude Niepce, ISTE Ltd., 96.
- Carbajal, L., Rubio-Marcos, F., Bengochea, M.A., Fernandez, J.F. (2007), Properties related phase evolution in porcelain ceramics, Journal of the European Ceramic Society, Volume 27, Issues 13-15, 4065-4069.
- Carty, W.M. ve Senapati, U. (1998), Porcelain-raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behaviour, J. Am. Ceram. Soc., 81(1), 3-20.
- Cengiz Ö., (2011), Monoporosa (monoporosa) duvar karolarının pişirim koşullarının geliştirilmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 165.
- Eppler, R. A. and Eppler, D. R., (2000), Glazes and glass coatings, American Ceramic Society, Westerville, Ohio.
- Esposito L., Salem A., Tucci A., Gualtieri A., Jazayeri and S.H., 2005. The use of nepheline-syenite in a body mix for porcelain stoneware tiles, Ceramic International, 31, 233-240.
- Iqbal, Y., Messer, P.F., Lee, W.E. (2000), Microstructural evolution in triaxial porcelain, J. Am. Ceram. Soc. 83 (12), 3121–3127.
- Kingery, W.D., Bowen, H.K. and Uhlmann, D.R., (1976), Introduction to Ceramics, John Wiley & Sons., Inc., Canada.
- Manfredini, T., Pellacani, G.C., Romagnoli, M. (1995), Porcelainized stoneware tile, Am. Ceram. Soc. Bull., 74,76-79
- Martin-Marquez, J., Ma. Rincon, J. Ma. and Romero, M., 2008. Effect of firing temperature on sintering of porcelain stoneware tiles. Ceramic International, 34, 1867–1873.
- Rado P., (1969), An Introduction to the Technology of Pottery, Second edition, Pergamon Press, The Worcester Royal Porcelain Company Ltd., 99.
- Sanchez, E., Orts, M.J., Garcia-Ten, K., Cantavella, V. (2001), Porcelain tile composition effect on phase formation and end product, Am. Ceram. Soc. Bull. 80 (6), 43-49.
- Tarhan B., Tarhan M. and Aydın T., 2017. Reusing sanitaryware waste products in glazed porcelain tile production, Ceramics International, 43, 3107-3112.
- Tarhan, M., 2010. Porselen karo bünyelerinde sinterleme hızı-kompozisyon ilişkileri. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 230.
- Tarhan B., (2019) Usage of fired wall tile wastes into fireclay sanitaryware products. J Aust Ceram Soc., <https://doi.org/10.1007/s41779-018-0285-1>
- Tarhan, M. ve Tarhan B., (2019), Afyon kilinin porselen karo bünyelerinde kullanımının araştırılması, Uluslararası Mühendislik ve Araştırma Dergisi, <https://doi.org/10.29137/umagd.433307>.
- Villegas-Palacio, S. and Dinger, D.R., 1996. PSD effects on firing properties of porcelains I-II, American Ceramic Society Bulletin, 75, n. 7, 71-83.
- Worrall, W. E. (1982), Ceramic raw materials. Second edition. Pergamon Press, University of Leeds, Leeds, UK.
- Zanelli, C., Baldi, G., Dondi, M., Ercolani, G., Guarini, G. and Raimondo, M., 2008. Glass–ceramic frits for porcelain stoneware bodies: Effects on sintering, phase composition and technological properties. Ceramic International, 34, 455–465.



Küçük Ölçekli Francis Türbini Tasarımı Ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi

Small Scale Francis Turbine Design And Computational Fluid Dynamics Analyses

Hakan Yontar¹, Salih Karaaslan¹, Nuri Yücel¹

¹Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 24/04/2019

Kabul/Accepted: 18/06/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Bu çalışmada, küçük ölçekli Francis türbini bileşenlerinin tasarımı ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri gerçekleştirilmiştir. Bovey yöntemi kullanılarak çark kanadı analitik ve ampirik bağıntılar ile tasarlanmıştır. Çark ve ayar kanadı meridyenel profilleri ANSYS Bladegen V17.0'da oluşturulmuştur. Ağ yapısı ANSYS Turbogrid ile oluşturulmuştur. Salyangoz ve emme borusu tasarımlarının geometrileri Solidworks 2013'de oluşturulmuştur. Türbin bileşenleri ve tüm türbin için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri k-ε türbülans modeli kullanılarak yapılmıştır. HAD analizleri kararlı çalışma şartları için gerçekleştirilmiştir. Analizlerin sonucunda basınç dağılımları ve akış hız çizgileri elde edilmiştir. Türbine ait elde edilen verim değeri incelenmiştir. Analitik yöntemler kullanılarak elde edilen verim ile HAD analiz sonuçlarındaki verim karşılaştırıldığında, %2 fark olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“Francis Türbini, HAD, Turbomakina, Türbin Tasarımı”

Abstract

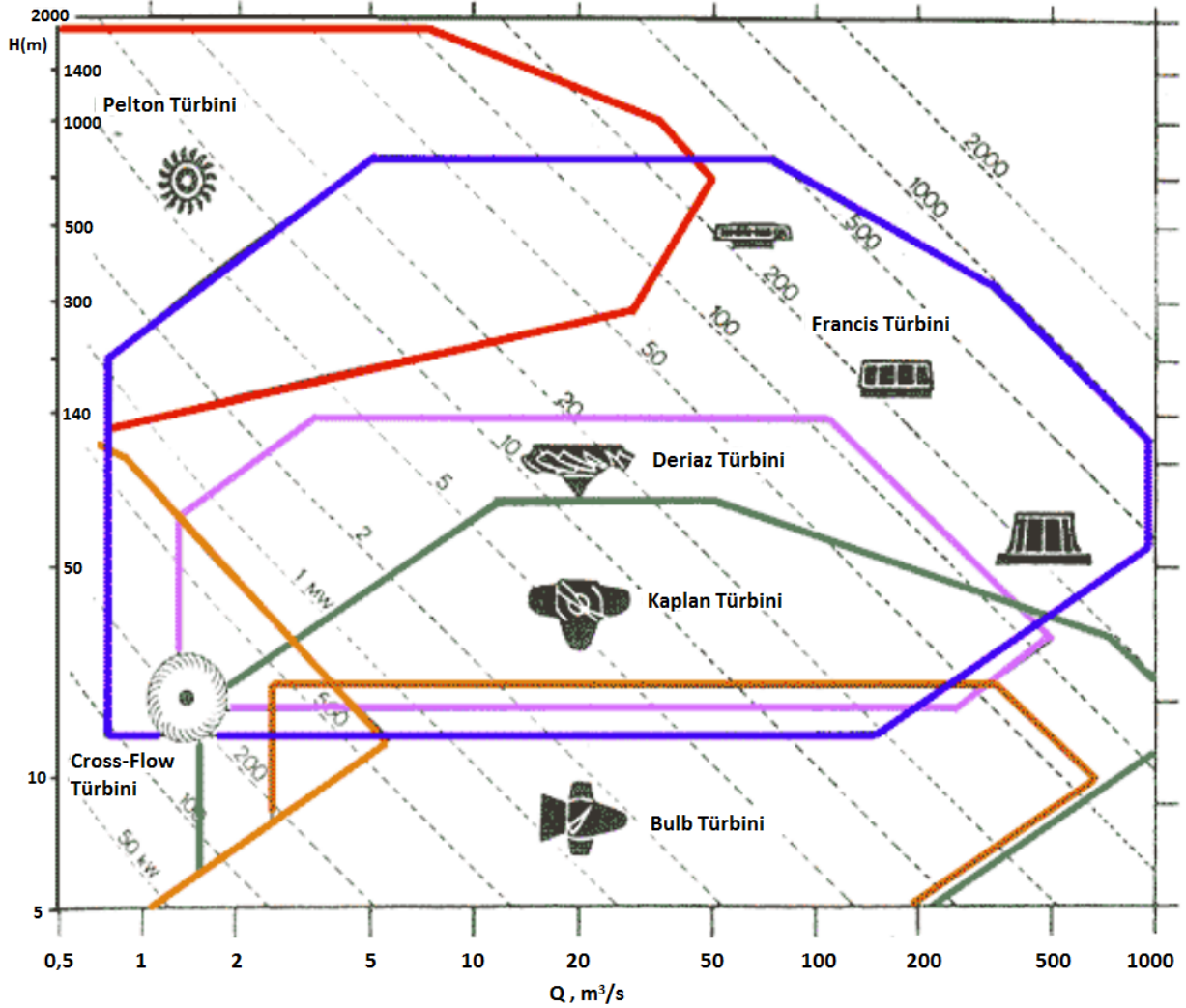
In this study, the design and numerical analysis of small scale Francis turbine components were performed. According to the Bovey method, analytical calculations of single blade were performed. Runner and wicket gate meridional profiles were created in ANSYS Bladegen V17.0. Grid models were created in ANSYS Turbogrid V17.0. The geometries of the spiral case and draft tube designs were created in Solidworks 2013. Computational fluid dynamics (CFD) analyzes for turbine components and turbine were performed in steady state with k-ε turbulence model. As a result of the CFD analyses, pressure distributions and flow lines were obtained. The efficiency of the turbine was examined. When the efficiency in design and CFD analysis results were compared, it was seen that there was a difference of %2.

Key Words

“Francis Turbine, CFD, Turbomachinery, Turbine Design”

1. Giriş

Dünya’da enerjiye olan talep sanayileşme, kentleşme ve nüfus artışının sonucu olarak her geçen gün artmaktadır. Enerji kaynakları arasında hidroelektrik santralleri; çevreye uyumlu, temiz, yenilenebilir, yüksek verimli ve işletme giderleri düşük olan bir kaynaktır. Dünya’daki elektrik üretiminin %17’si hidroelektrik ile gerçekleşmektedir(The USGS Water Science School). Hidroelektrik en önemli ve en çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Hidroelektrik santrallerde kullanılan türbinler çarpma etkili ve reaksiyon türbinleri olarak 2 ana tipe sınıflandırılır. Debi ve düşü değerleri kullanılarak bu sınıflandırma şekil 1’deki gibi yapılmaktadır. Francis türbinleri türbin seçim tablosunda da görüldüğü gibi geniş çerçevedeki debi ve düşü kullanımı ile en çok kullanılan hidrolik türbin tipidir. Bu türbinin en önemli parçası potansiyel enerjiyi mekanik enerjiye çeviren çark kısmıdır. Genel olarak türbin çarkları karışık geometrilere sahiptir. Bu nedenle, çark tasarımları ve üretimleri yüksek verim elde etmek için önemlidir.



Şekil 1. Debi Ve Düşü Değerlerine Göre Türbin Seçim Tablosu(Haas&Hiebert&Hoatson, 2014)

Çark tasarımı ile ilgili literatürde çok fazla araştırma mevcuttur. Bovet yöntemi de bunlardan biridir. Bu yöntemde, ampirik denklemler kullanılarak Francis türbin çarkı parametreleri elde edilmiştir. Türbinin tüm ölçülerini tanımlamak için boyutsuz özgül hız değeri ana parametre olarak kullanılmıştır(Bovet, 1963).

Türbin tasarımı ile ilgili literatürdeki araştırmalar incelendiğinde; Ruprecht, Heitele ve Helmrich (2014) tarafından Francis tipi bir türbinin modellemesini zamana bağlı olarak çözümlenmiştir. Hesaplamalar Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her komponent bağımsız olarak hesaplanmıştır. Daha sonra tüm türbine ait hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplama alanı dört bileşene(salyangoz, çark, emme borusu ve ayar kanatları) ayrılmıştır. Her bileşen için bağımsız ağ yapıları oluşturulmuştur ve farklı bileşenlere ait ağ yapıları üst üste bindirilmiştir. Oluşturulan bu ağ yapısı 2 milyondan fazla eleman içermektedir. Hesaplamalar kısmi yük ve optimum olmak üzere iki farklı işlem noktası için gerçekleştirilmiştir. Bütün hesaplamalar 24 sabit ve ayar kanatlı ve 13 çark kanatlı bir türbin için gerçekleştirilmiştir. Bütün bu hesaplamalarda amaç önemli nicel sonuçlar elde etmek değil bir uygulanabilirlik çalışması gerçekleştirmektir. Türbinler için bu ve benzeri hesaplamalar, simülasyonların uygulanabilir olduğunu, beklenen yük ve dinamik kuvvetler düşünüldüğünde nicel olarak doğru sonuçların elde edildiğini göstermektedir. Daha doğru çözümler için daha iyi ağ yapısı oluşturulması gerekmektedir. Hesaplamalardaki en büyük zorluklardan biri, başlangıç periyodunda ve frekanslarda çok farklı olan akış fenomenlerinin varlığıdır (Ruprecht&Heitele&Helmrich). Liv vd. (2010) yapılan çalışmada Francis türbinini zamana bağlı olarak HAD yardımı ile çözümlenmiştir. Reynolds ortalama süreklilik ve Navier Stokes denklemlerini ve dönme sistemi momentum denklemlerini kullanarak çark bölgesinin korunum denklemlerini elde etmişlerdir. Çalışmada RNG k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Simülasyon

sonuçları ve deney sonuçları karşılaştırıldığında her iki verinin de birbiriyle uyumlu olduğunu ve hidrolik türbine ait tüm parametrelerin değişiminin geçici süreç boyunca tahmin edilebileceğini göstermektedir. Neopane, vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada, kum erozyonu etkisini en aza indirmek için Francis türbinine alternatif bir tasarım önerilmiştir. Türbinin tasarımını iki ana aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk adım, deneysel verilere ve Euler'in türbin denkleminde dayanan ilk tasarımdır. İkinci adım, ayar kanatlarından çark kanat girişine doğru tek düze bir akış alanının varsayımına dayanan tasarımın ince ayarlanması için üç boyutlu HAD analizidir. Francis çarkı prototipinin son ayarlamaları için sayısal yöntemler kullanılmıştır. HAD ile birlikte yinelemeli bir tasarım yöntemi kullanılmıştır. Huang vd. (2006) Swiderski, Ji, Tung ve Riley; bir hidroelektrik santralindeki kavite sorunlarını çözmek için bir durum çalışması gerçekleştirmiştir. Francis türbin ünitesi 10 sabit kanat, 16 adet ayar kanadı ve 14 kanatlı bir çarktan oluşmaktadır. Tüm ağ yapısı TASCgrid (CFX-TASCflow) yazılımı ile oluşturulmuştur. Proje kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda sadece çark değiştirilmiştir. CFX kullanılarak optimize edilen yeni çarkın aşırı yükler altında kaviteyonu ortadan kaldırdığı görülmüştür. Odesola ve Oririabre (2013); 5 kW gücünde bir Francis türbin çarkını hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı ile geliştirmişlerdir. Bu çalışmada 6 m net düşü ve 0.244 m³/s hacimsel debi şartları altında tüm türbin bileşenleri (salyangoz, sabit/ayar kanatları, emme borusu) iki farklı ticari yazılımın karşılaştırmalı olarak kullanılmasıyla sayısal olarak irdelenmiştir. Teran vd (2016); 500 kW'lık bir Francis türbininin yapay ağ yöntemi ile geliştirilmiş bir kod vasıtası ile daha verimli hale getirmeye çalışmıştır. Aynı zamanda türbin çarkı üzerinde oluşan kavite miktarlarını da sayısal ortamda azaltarak analiz etmiştir. Lain vd (2010); Francis türbinindeki iç akışı sayısal olarak incelemiştir. Türbin bileşenlerinde meydana gelen enerji kayıpları için zamandan bağımsız, türbin üzerinde meydana gelen dinamik basınç değişimi ve rotor-stator etkileşimleri için de zamana bağlı olmak üzere iki farklı yaklaşım ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği prensiplerinin kullanıldığı bir sayısal yaklaşım gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar için ANSYS CFX yazılımı kullanılmıştır. Wang (2012), optimum kanat tasarımı elde etmek için HAD ve CAD yöntemlerini birlikte kullanarak bir simülasyon çalışması gerçekleştirmiştir. Ön tasarımla elde edilen boyutlar esas alınarak CAD ortamında oluşturulan türbin çarkı akış alanında HAD simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. Bu simülasyonlarda akış yapısında görülen yerel bozuklukları gidermeye yönelik tasarım değişikliklerini yaparak simülasyonlar tekrarlanmış, hidrolik verimi yüksek, kavite riski düşük kanat yapıları belirlenmiştir.

Bu çalışmada, küçük ölçekli bir Francis türbinin tüm bileşenlerinin analitik hesapları ve sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarım için belirlenen net düşü ve debi değerleri 40 m ve 0,4 m³/s'dir. Tekil kanat Bovet yöntemi ile tasarlanmıştır. Ayar kanat hesabı ise Krivchenko'nun kitabındaki formüller ile tasarlanmıştır (Krivchenko, 1983). ANSYS Bladegen V17.0 ile çark ve ayar kanadı geometrileri oluşturulmuştur. Salyangoz ve Emme borusu geometrileri Solidworks 2013 katı model yazılımı ile oluşturulmuştur. ANSYS CFX V17.0 yazılımı ile sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Terminoloji

<i>b</i>	Ayar kanadı yüksekliği(mm)
<i>H</i>	Türbin net düşüsü(m)
<i>l</i>	Uzunluk(m)
<i>N</i>	Dönme hızı(rad/s)
<i>n</i>	Özgül dönme hızı
<i>R</i>	Meridyenel profilin özgül yarıçapı(m)
<i>Ḃ</i>	Hacimsel debi(m ³ /s)
<i>v</i>	Özgül hacimsel debi(m ³ /s)
<i>β</i>	Kanat açısı
<i>μ</i>	Viskozite
<i>D_g</i>	Ayar kanat merkezinin çapı(m)
<i>L_g</i>	Ayar kanat eğrilik uzunluğu(m)
<i>t_g</i>	Ayar kanatları arasındaki dikey mesafe(m)

2. Tasarım

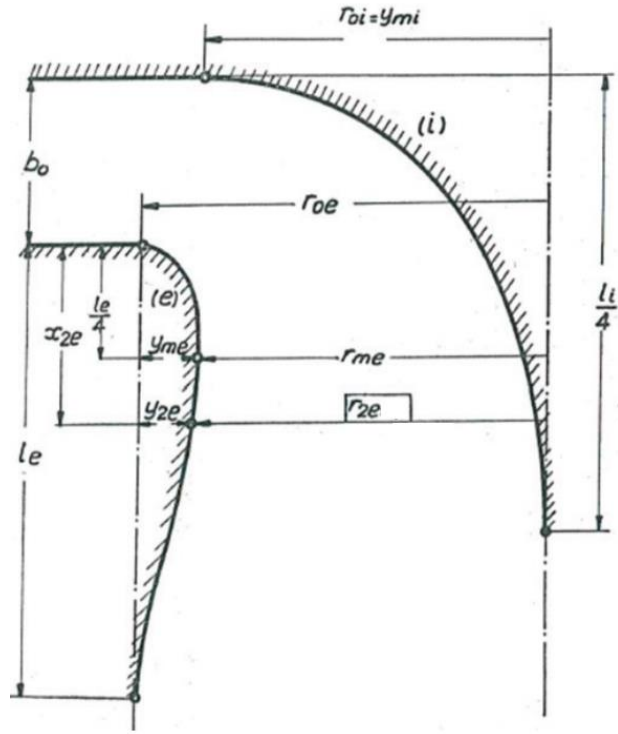
2.1. Çark Tasarımı

Düşü ve debi türbin için nihai tasarımı belirleyici temel unsurlardır. Bu çalışmada, belirlenen bir bölgedeki debi ve düşü verilerine uygun Francis tipi bir hidrolik türbinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Türbin seçiminde debi ve düşü değerleri önemli göstergelerdir. Francis türbinleri yavaş, orta ve yüksek hızlı olarak sınıflandırılır. Bu sınıflandırma özgül hız değerine bağlıdır. Özgül hız değerine bağlı olarak yapılan bu sınıflandırma farklı çark şekillerinin görülmesine neden olur. Farklı özgül hızlar meridyenel profillerin oluşmasını sağlar.

Özgül dönme hızı Bovet (1963) tarafından aşağıdaki formül ile tanımlanmıştır.

$$n = \frac{N \left(\frac{v}{\pi} \right)^{0,5}}{(2gH)^{0,75}} \quad (1)$$

Bovet yöntemine göre *n* özgül dönme hızı ile çark kanalının şekli tamamen belirlenebilmektedir. Çark kanalının şeklini belirleyen denklemler aşağıda belirtilmiştir (Bovet, 1963).



Şekil 2. Çark Kanadı Meridyenel Profili(Bovet, 1963)

$$b_0 = 0,8(2 - n)n \quad (2)$$

$$r_{oi} = y_{mi} = 0,7 + \frac{0,16}{n+0,08} \quad (3)$$

$$r_{oe} = 1,255 - 0,3n \quad (4)$$

$$l_i = 3,2 + 3,2(2 - n)n \quad (5)$$

$$l_e = 2,4 - 1,9(2 - n)n \quad (6)$$

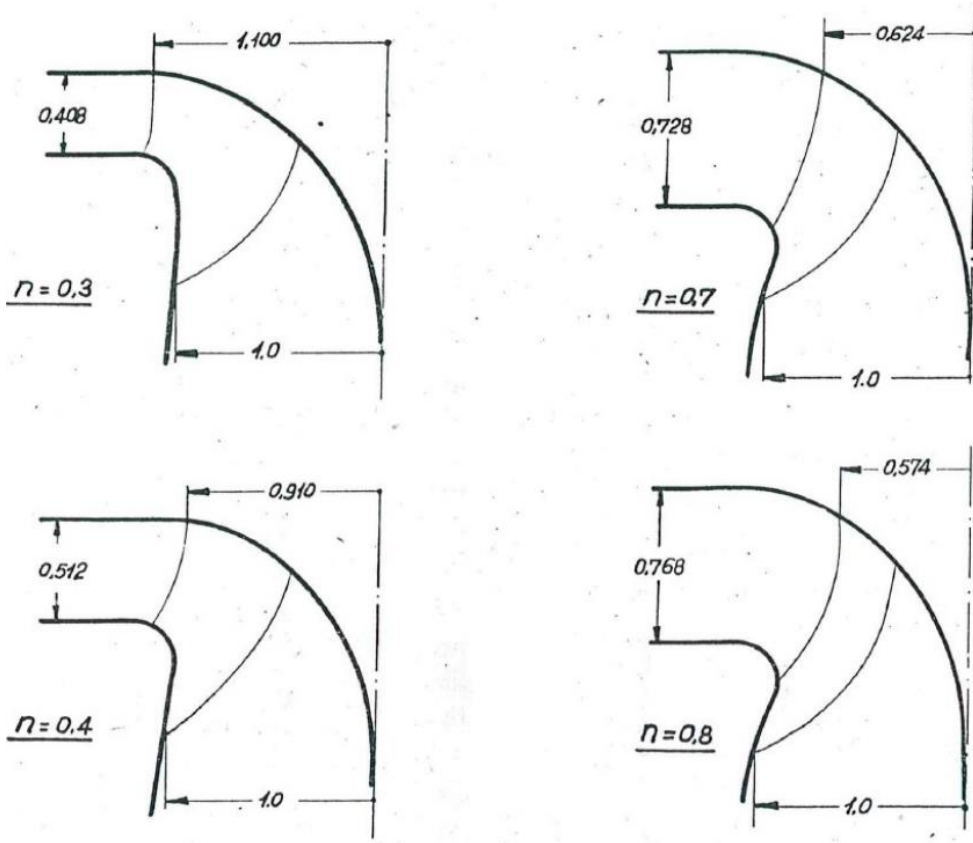
$$y_{2e} = r_{oe} - 1 \quad (7)$$

$$y_{me} = \frac{y_{2e}}{y_{2e}/y_{me}} \quad (8)$$

$$r_{me} = r_{oe} - y_{me} \quad (9)$$

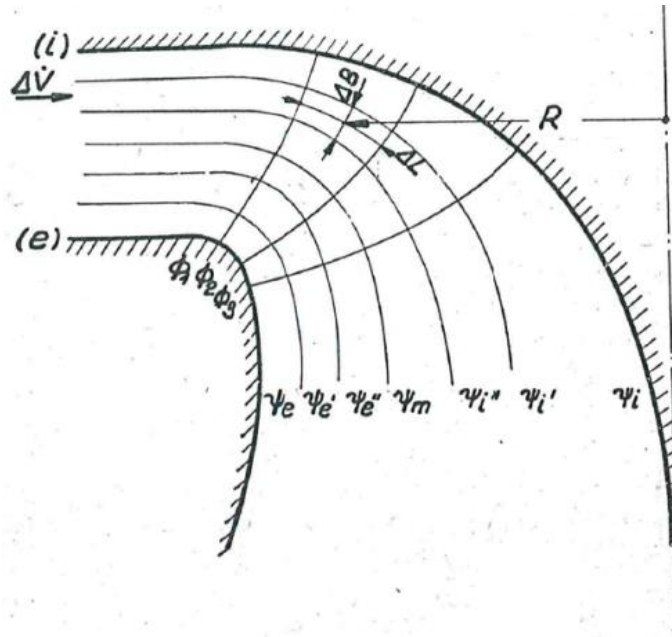
$$R_{2e} = \left(\frac{\dot{V}}{\pi N v_{2e}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

$$R_{1i} = \left(\frac{2gH}{N^2 h_{1i}} \right)^{1/2} \quad (11)$$



Şekil 3. Özgül Dönme Hızına Göre Çark Kanalı Formunun Değişimi (Bovet, 1963)

Yukarıdaki hesaplar ile çark kanalının giriş ve çıkış noktaları belirlenerek meridyenel profil oluşturulmuş ve çark kanadının iç eğri (hub) ve dış eğri (shroud) ile kesiştiği noktalar belirlenmiştir. Bovet yönteminde, çark kanadı birbirine eşit akış hızlarına sahip akış çizgilerine ayrılmaktadır. Çark kanadı iç eğri (hub) kısmından dış eğri (shroud) kısmına kadar i , i' , i'' , m , e'' , e' ve e isimlerinde olmak üzere toplam 7 akış çizgisine bölünmüştür.



Şekil 4. Meridyenel Profildeki Akış Çizgileri (Bovet, 1963)

Bu çalışmada belirlenen net düşü ve debi değerleri 40 m ve 0,4 m³/s'dir. Türbin dönme hızı 1500 d/dak'dır. Çark için taahhüt edilen verim %92'dir. Bu parametreler ile denklem 1'de yerine konduğunda özgül dönme hızı 0,378 olarak elde edilmiştir. Denklem 2'den 11'e kadar elde edilen değerler Tablo 1'de belirtilmiştir. Çark kanalının büyüklüğünü tespit edebilmek için R_{2e} çapını belirlemek yeterlidir. Bu değer denklem 10'dan 144,3 mm olarak elde edilmiştir.

Tablo 1. Meridyenel Profilden Elde Edilen Değerler

Meridyenel Profil Parametreleri	Boyut Katsayısı	Gerçek Boyut(mm)
b_0	0,49	73,5
$r_{0i} = y_{mi}$	1,049	157,35
r_{0e}	1,1416	171,24
l_i	5,1619	774,285
l_e	1,235	185,25
y_{2e}	0,1416	21,24
y_{me}	0,1575	23,625
r_{me}	0,9841	174,615
x_{2e}	0,5	75

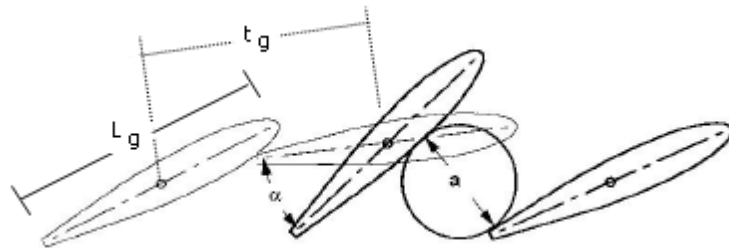
Bu hesaplardan sonra belirlenen 7 akış çizgisi için giriş ve çıkış kenarlarının yarıçapları ve açıları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Akış Çizgilerinin Giriş Ve Çıkış Kenarlarındaki Yarıçapları Ve Açılı

Akış çizgileri	R_1 (mm)	β_1	R_2 (mm)	β_2
i	136,00	60,81	62,95	34,91
i'	136,11	60,61	70,67	30,65
i''	136,33	60,21	83,57	25,54
m	136,82	59,34	101,01	20,89
e''	138,91	55,85	117,54	17,85
e'	142,92	49,98	131,92	15,85
e	149,29	42,59	144,30	14,46

2.2. Ayar Kanatları Tasarımı

Ayar kanatları, eksenleri etrafında dönerek çark etrafındaki akışın dağıtılmasını ve türbine gelen akışın hızının ayarlanmasını sağlamaktadır.

**Şekil 5.** Ayar Kanadı (ESHA, 2004)

Ayar kanadı çapı D_g genelde çark giriş çapının 1,16 katı olarak seçilir. Ayar kanat çapı belirlendikten sonra, ayar kanat sayısı belirlenir. Genelde 12,16 veya 24 seçilir. Su geçişine izin vermeyecek ve kapalı pozisyonda üst üste binecek şekilde ayar kanat uzunluğu hesaplanır. Genel kabul görmüş kural olarak aşağıdaki denklemler uygulanır (Krivchenko, 1983).

$$L_g / t_g = 1,1 \quad (12)$$

Kapalı konumda %10 üstüne binme durumundaki ayar kanat uzunluğu;

$$L_g = \frac{\pi D_g}{\text{ayar kanatları sayısı}} \cdot \frac{1}{0,9} \quad (13)$$

$$t_g \approx \frac{\pi D_g}{\text{ayar kanatları sayısı}} \quad (14)$$

Normal çalışma rejiminde ayar kanatları doğrultu açısı (Bovet, 1963);

$$\tan \alpha_0 = \frac{1}{\pi B_0 h_i} \frac{N \dot{V}}{2gH} \quad (15)$$

Ayar kanat sayısı 16 olarak belirlenmiştir. Denklem 12-15 hesaplandığında Tablo 3'deki değerler elde edilmiştir.

Tablo 3. Ayar Kanat Ölçüleri Ve Doğrultu Açısı

D_g (mm)	L_g (mm)	t_g (mm)	α_0
157,76	34,42	31,29	19,98

2.3. Salyangoz Tasarımı

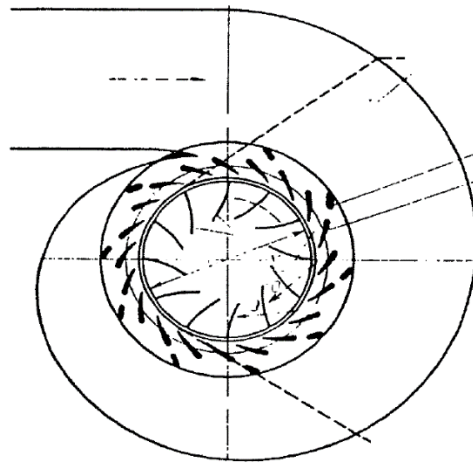
Salyangoz içindeki suyun, salyangozun her kesitine eşit ve sabit bir değerde dağılması gerekir. Cebri borudan gelen suyu, sabit ve ayar kanatlarına dağıtabilmesi için salyangoz sabit kanatların çevresine sarılır.

Salyangoz içerisindeki hız (Ergin, 1972);

$$C = k\sqrt{2gH_d}; k = 0,2 - 0,3 \quad (16)$$

Salyangoz kesit hesabı (Ergin, 1972);

$$\dot{V} = \frac{\pi d_s^2}{4} C \quad (17)$$



Şekil 6. Salyangoz Görünümü (Krivchenko, 1986)

Denklem 16 ve 17 kullanılarak tablodaki değerler elde edilmiştir.

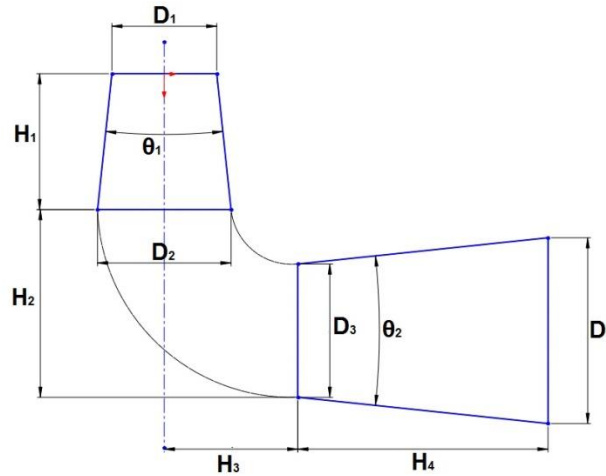
Tablo 4. Salyangoz Kesit Ölçüleri Ve Debileri

Kesit Sayısı	Debi dağılımı	Debi(m ³ /s)	Salyangoz Kesit Çapı d_s (m)
1	16/16	0,4	0,24623
2	15/16	0,375	0,23841
3	14/16	0,35	0,23032
4	13/16	0,325	0,22195
5	12/16	0,3	0,21324
6	11/16	0,275	0,20416
7	10/16	0,25	0,19466
8	9/16	0,225	0,18467
9	8/16	0,2	0,17411
10	7/16	0,175	0,16286
11	6/16	0,15	0,15078
12	5/16	0,125	0,13764
13	4/16	0,1	0,12311
14	3/16	0,075	0,10662
15	2/16	0,05	0,08705
16	1/16	0,025	0,06155

2.4. Emme Borusu Tasarımı

Emme borusu tasarımındaki dikkate alınması gereken en önemli parametre geri kazanım oranıdır. Geri kazanım oranı aracılığıyla suyun sahip olduğu kinetik enerjinin ne kadarının basınca dönüştüğü ifade edilmektedir. Emme borusunun şematik yapısı şekilde verilmiştir. Emme borusu giriş çapı çark çıkış çapına eşit alınmıştır. $H_1, H_2, H_3, H_4, \theta_1$ ve θ_2 parametreleri değiştirilerek geri kazanım oranı yüksek bir emme borusu tasarımı hedeflenmiştir. Küçük türbinlerde emme borusu genelde dairesel kesitli konik borulardan imal edilmektedir. Koni açısının büyük olması daha fazla enerji toplanmasını sağlamaktadır. Emme borusunun çok fazla uzun olmaması için genelde dirsek kullanımı tercih edilmektedir (Ergin, 1972).

$$C_p = \frac{P_{\text{çıkış}} - P_{\text{giriş}}}{\frac{\rho V^2}{2g}} \quad (18)$$



Şekil 7. Emme Borusu Şekli Ve Tasarım Parametreleri

Tablo 5. Emme Borusunda Değiştirilen Parametrelerin Geri Kazanım Oranına Etkisi

Değiştirilen Parametreler	Sonuç	Geri Kazanım Oranı
H_4 , D_4 ve θ_2 değerleri azaltıldı.	Akış çizgilerindeki ayrışma ve basınç dağılımı değişmedi. Geri kazanım oranı azaldı.	0,7557
θ_2 açısı artırıldı.	Akış çizgilerindeki ayrışma ve basınç dağılımı değişmedi. Geri kazanım oranı arttı.	0,7629
H_1 ve θ_2 artırıldı.	Akış çizgilerindeki ayrışma azaldı ve basınç dağılımı düzeldi. Geri kazanım oranı arttı.	0,81188
θ_2 açısı biraz daha artırıldı.	Akış çizgileri emme borusu çıkışında bozuldu. Basınç dağılımı bozuldu. Geri kazanım oranı azaldı.	0,80366
θ_2 açısı azaltıldı	Akış çizgilerinin emme borusu çıkışındaki bozulması azaldı. Geri kazanım oranı azaldı.	0,80223

Emme borusu için yapılan optimizasyon çalışması sonucu elde edilen maksimum geri kazanım oranı 0,81188'dir. Bu değer doğrultusunda ortaya çıkan emme borusu nihai tasarım parametreleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 6. Emme Borusu Nihai Tasarım Parametreleri

Tasarım Parametreleri	Boyut
D_1	288,6 mm
D_2	367,36 mm
D_3	367,36 mm
D_4	494,15 mm
H_1	374,675 mm
H_2	517,17 mm
H_3	367,36 mm
H_4	688,36 mm
θ_1	12°
θ_2	12°

3. Sayısal Analiz

Tüm türbinin hidrolik verimi için HAD analizleri gerçekleştirilmeden önce türbin bileşenlerinin sırasıyla HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle çark kanadı verimliliği için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Kanat üzerindeki basınç dağılımları ve akış çizgileri tespit edilmiştir. Daha sonra, ayar kanatları, salyangoz ve emme borusu için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Çark kanadı ve ayar kanadı geometrileri ANSYS Bladegen V17.0'da oluşturuldu. Oluşturulan kanat geometrilerinin ANSYS TurboGrid V17.0 modülü ile ağ yapıları oluşturulmuştur.

Literatürdeki çalışmalarda k-ε türbülans modeli yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürdeki deneysel verilerle doğrulanmış pek çok çalışmada k-ε türbülans modelinin kullanıldığı görülmüştür. Geometriye ve akış rejimine bağlı olmadan k-ε türbülans modeli ile başarılı sonuçlar alınabilmektedir. HAD analizleri için akışkan olan su tek fazlı ve sıkıştırılmaz olarak seçilmiştir. Analizler kararlı hal için gerçekleştirilmiştir. ANSYS CFX Solver Guide'da belirtilen temel denklemler kullanılmıştır (CFX Solver Theory Guide, 2013).

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (19)$$

Momentum Denklemi;

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j U_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (20)$$

Türbülans kinetik enerji ve dağılım oranı için k ve ε değerleri aşağıdaki diferansiyel denklemlerden gelmektedir.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon + P_{kb} \quad (21)$$

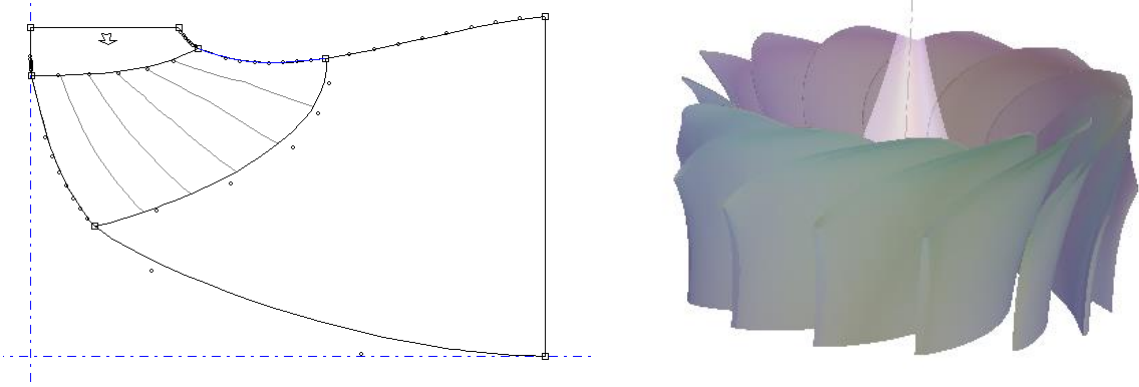
$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} [C_{\epsilon 1} P_\epsilon - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon + C_{\epsilon 3} P_{\epsilon b}] \quad (22)$$

Tüm türbin ve bileşenleri için yapılan HAD analizlerinde giriş sınır şartı toplam basınç, çıkış sınır şartı kütleli debi olarak ayarlanmıştır. Çark analizlerinde akış hacminin yan duvarları için dönme periyodik olarak düzenlenmiştir. İç eğri, dış eğri ve kanat yüzeyleri için kaymaz duvar sınır koşulları olarak kabul edilmiştir. HAD analizlerinde ANSYS CFX modülünün 'Turbo mode' özelliği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4. Analiz Sonuçları

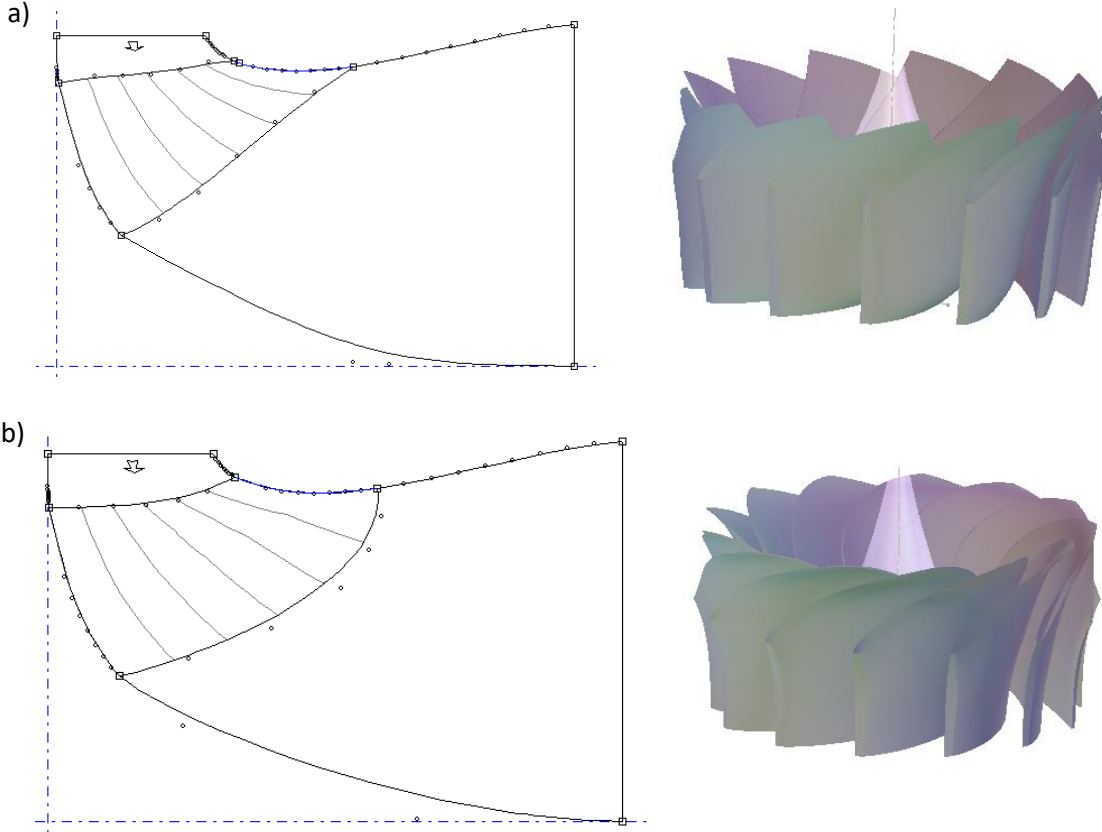
Yapılan HAD çalışmalarının sonuçları bu başlıkta sunulmuştur. Elde edilen sonuçlarda mutlak basınç, akış çizgileri gibi değerler de dikkatle incelenmiştir. Yüksek verim değerleri elde edebilmek için kanat üzerindeki basıncın kademeli olarak azalması gerekmektedir.

İlk olarak analizlere tasarımı tamamlanmış olan çark ile başlanmıştır. HAD analizleri sonucunda elde edilen ilk çark verimi %86,6 olmuştur.



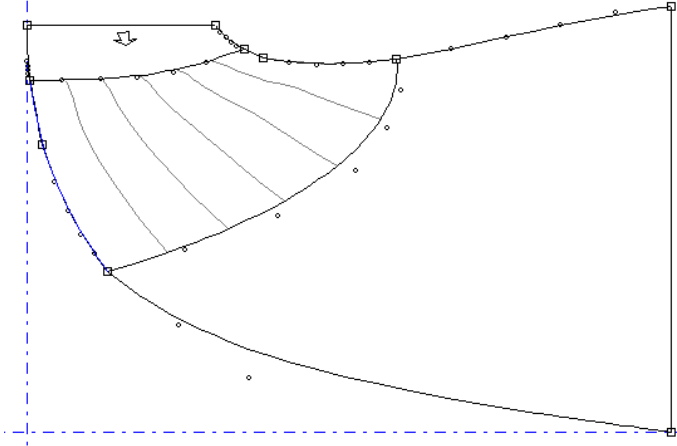
Şekil 8. İlk Çark İçin BladeGen'de Oluşturulan Meridyenel Profil

Kanat üzerindeki akım çizgilerinin açıları ve konumları değiştirilerek farklı kanat profilleri elde edilmiştir. Elde edilen farklı kanat profilleri için analizler gerçekleştirilerek çark verimindeki değişimler gözlemlenmiştir.

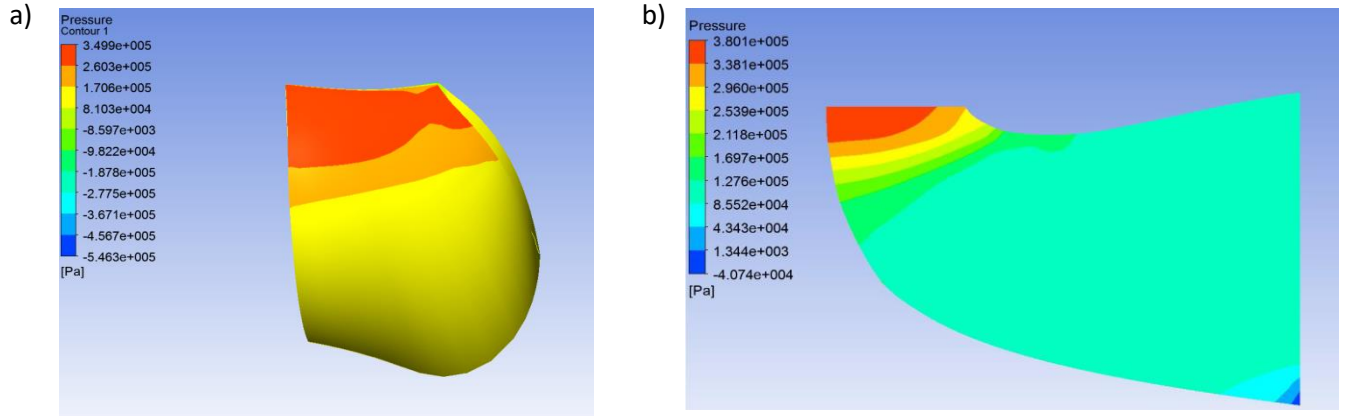


Şekil 9. Akım Çizgilerinin Açılı ve Konumları Değiştirilerek Elde Edilen Kanat Meridyenel Profillerinden Örnekler
a) %87 Verim Elde Edilen Kanat Meridyenel Profili; b) %89 Verim Elde Edilen Kanat Meridyenel Profili

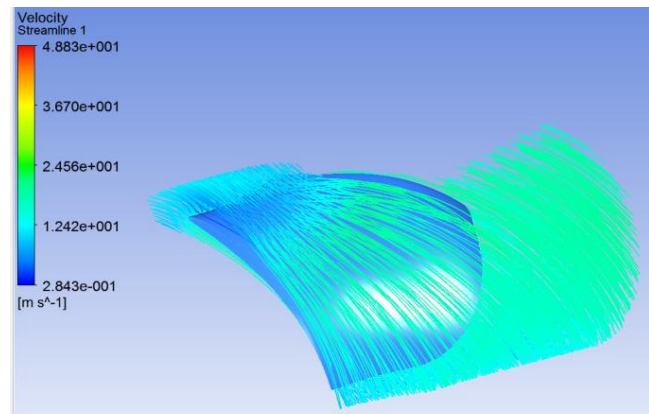
Elde edilen kanat profillerinde yapılan analizlerin sonrasında, kanat üzerindeki akış hacminin artmasının verime pozitif etkisinin olduğu görülmüştür. Kanat üzerindeki akım çizgilerine ait hücum açılarının artmasının da aynı şekilde verime pozitif etkisinin olduğu görülmüştür. Bu gözlemler sonucunda nihai kanat meridyenel profili oluşturulmuştur ve çark analizleri gerçekleştirilmiştir. %91,52 verim değerine sahip çark kanadı meridyenel profili elde edilmiştir.



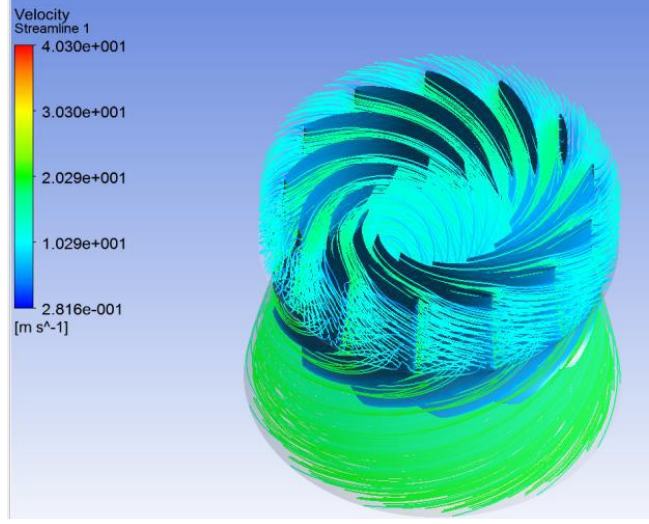
Şekil 10. %91,52 Verim Değerine Sahip Kanat Meridyenel Profili



Şekil 11. Çark Kanadı a) Basınç Dağılımı; b) Meridyenel Profildeki Basınç Dağılımı

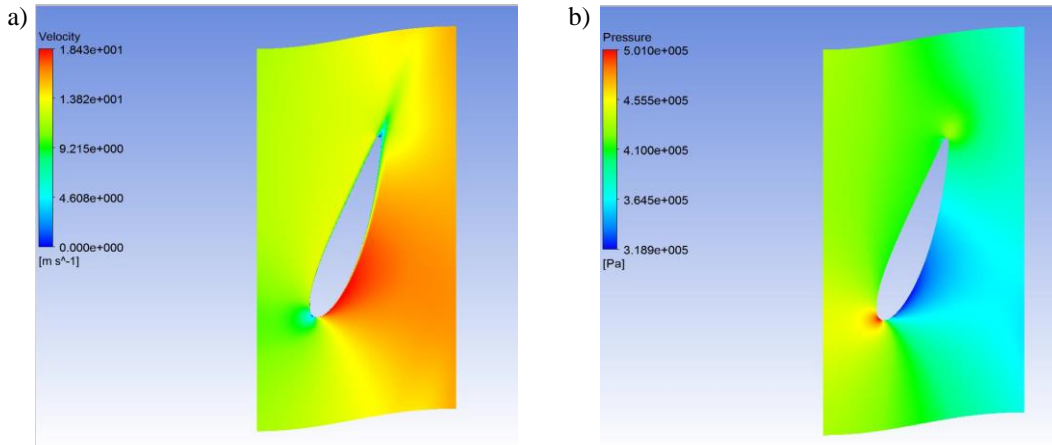


Şekil 12. Kanat Yüzeyindeki Akış Dağılımı

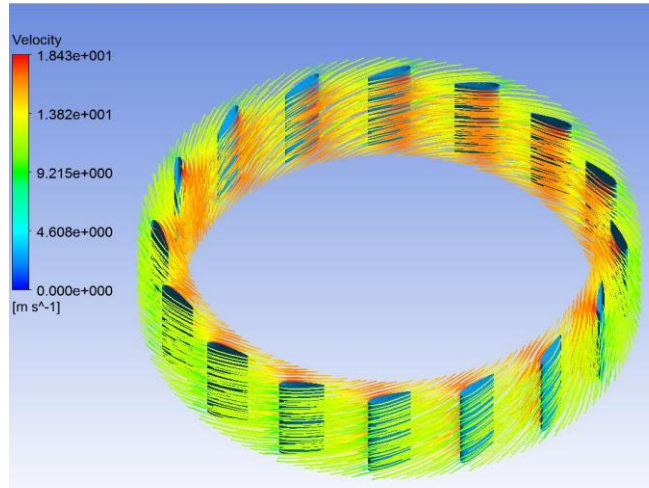


Şekil 13. Çark Akış Dağılımı

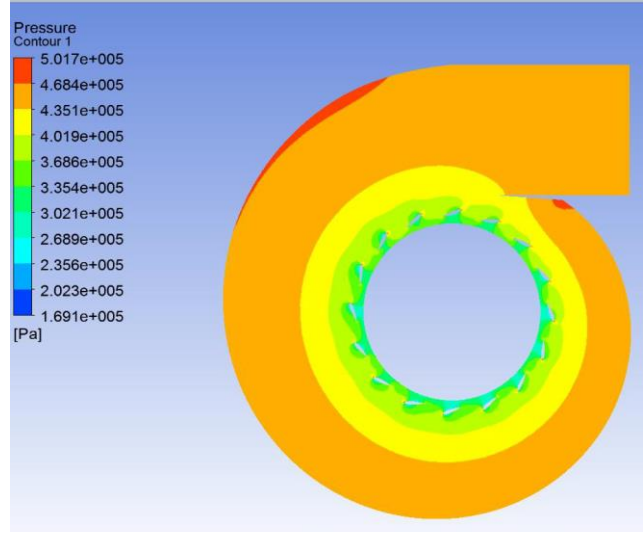
Çark analizleri tamamlandıktan sonra tasarımı tamamlanan ayar kanatları, salyangoz ve emme borusu için analizler gerçekleştirilmiştir.



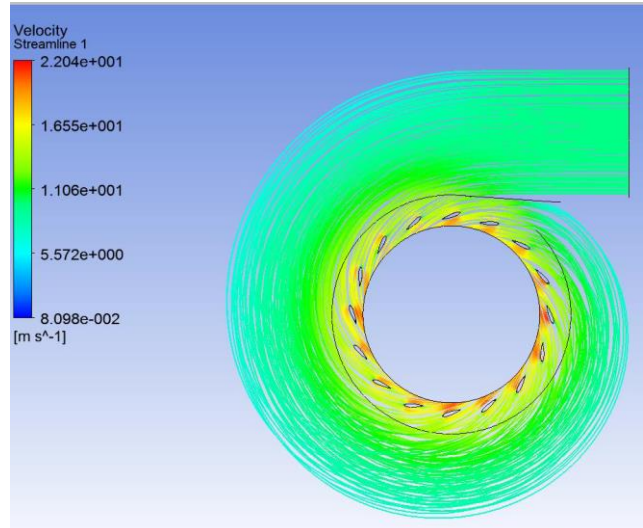
Şekil 14. Ayar Kanadı a) Hız Dağılımı; b) Basınç Dağılımı



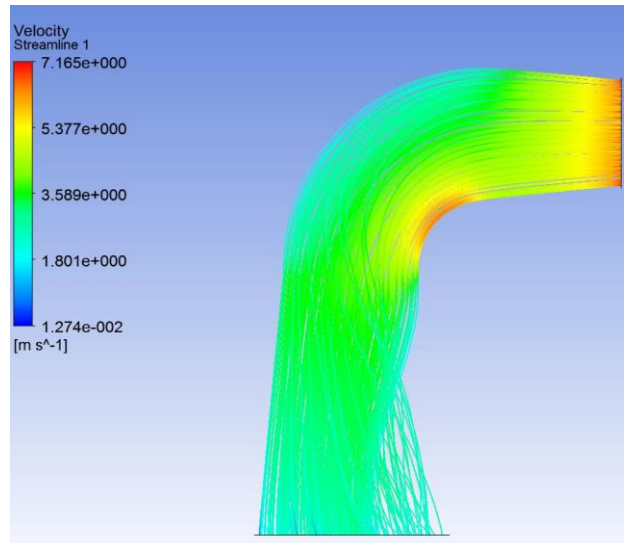
Şekil 15. Ayar Kanatları Hız dağılımı



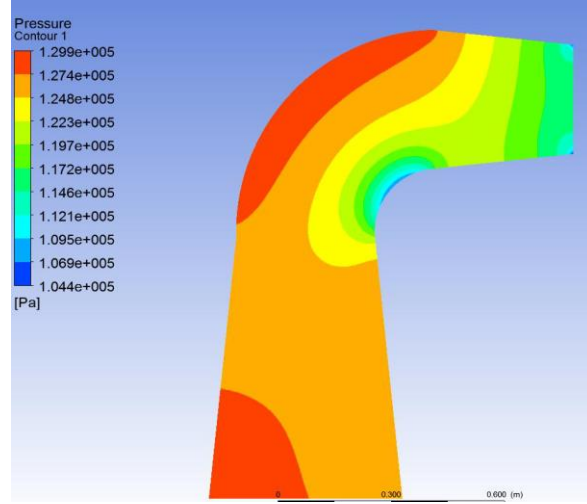
Şekil 16. Salyangoz Ve Ayar Kanatları Basınç Dağılımı



Şekil 17. Salyangoz Ve Ayar Kanatları Hız Dağılımı



Şekil 18. Emme Borusu Hız Dağılımı



Şekil 19. Emme Borusu Basınç Dağılımı

Çark kanadındaki basınç dağılımını incelendiğinde meridyenel düzlemde kanadın basınç değişimi beklendiği gibi gerçekleşmiştir. Kanat üzerinde herhangi bir ayrılma olmadan akışın ilerlediği görülmüştür. Böylece akışkan momentum transferi artmakta akışkan gücü kanat aracılığı ile türbine aktarılabilmektedir. Akışın ayrılma olmadan ilerlemesi yüksek verim elde etmek için önemli bir kriterdir. Akışkanın potansiyel enerjisini doğru bir şekilde çarka aktarmak için akışın kanat üzerinde ayrılmadan ilerlemesi gerekir. Çark üzerindeki akış çizgileri incelendiğinde kanadın çıkış tarafındaki hızın giriş tarafından daha hızlı olduğu görülmektedir. Basıncın kademeli düşmesinin sonucu olarak girişten çıkışa hız dağılımının düzgün bir şekilde geçiş yaptığı görülmektedir.

Türbin bileşenlerinin analizleri tamamlandıktan sonra mesh atılmış bileşenlerin montajı yapılmıştır ve tüm türbin için analizler gerçekleştirilmiştir. Analizde kullanılan ağ yapısı, ayarlar ve sınır şartları aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 7. Tüm Türbin Analizleri İçin Oluşturulan Ağ Yapısı

Eleman Sayısı	Dört yüzlü Eleman Sayısı	Altı yüzlü Eleman Sayısı	Ağ Sayısı
8847154	4483730	4363424	5588141

Tablo 8. Tüm Türbin Analizleri İçin Kullanılan Önemli Sınır Şartları

Türbülans Modeli	Duvar sürtünmesi	Referans basınç	Akışkan	Salyangoz giriş sınır şartı	Emme borusu çıkış sınır şartı	Çark dönme hızı
k-ε modeli	Sürtünmesiz Duvar	0 [Pa]	Su	493725 [Pa]	400 [kg/s]	1500 [d/dk]

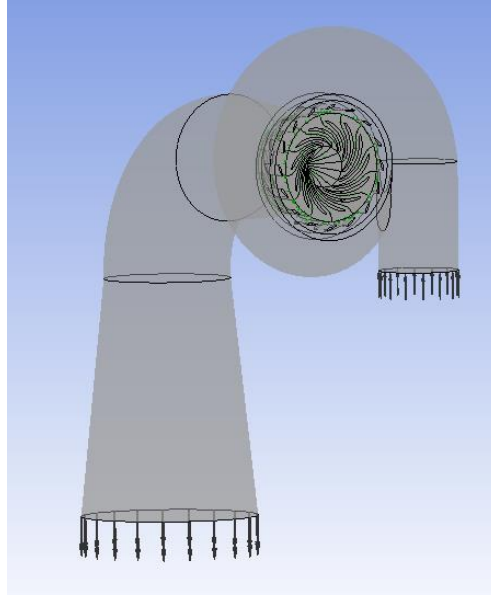
Tablo 9. Tüm Türbin Analizleri İçin Kullanılan Etki Alanları Arasındaki Ara Yüzler

Bağlantı	Değişen Çerçeve Modeli
GGI	Frozen Rotor

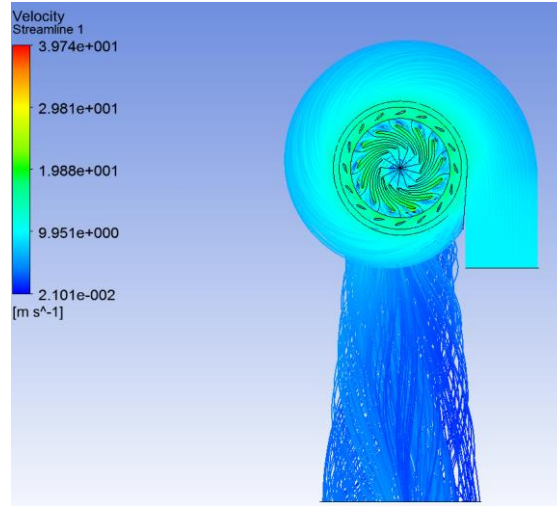
Tablo 10. Tüm Türbin Analizleri İçin Kullanılan Çözüm Şartları

Adveksiyon Şeması	Sayısal Türbülans	Yakınsama Hedefi	Yakınsama Tipi
Yüksek Çözünürlük	Yüksek Mertebe	10 ⁻⁶	RMS

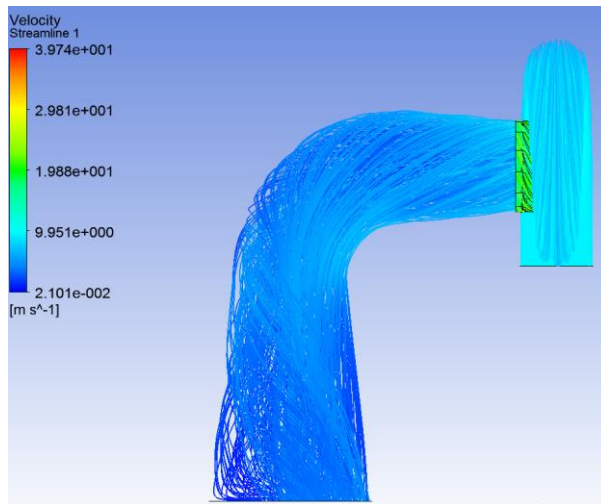
Türbine ait sayısal analiz sonuçları incelendiğinde; akış çizgilerinin salyangoz girişinden başlayarak bozulma gerçekleşmeden türbin boyunca ilerlediği, salyangozdaki yüksek basıncın ayar kanatları ve çark bölgesine ilerledikçe kademeli olarak azaldığı, akış hızının kanadın çıkış tarafında giriş tarafına göre daha hızlı olduğu ve çark kanatları üzerindeki basınç dağılımının kademeli olarak azaldığı görülmektedir.



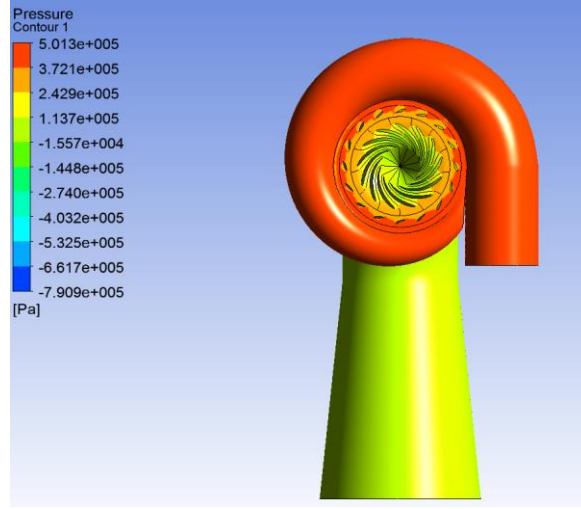
Şekil 20. Türbin HAD Modeli



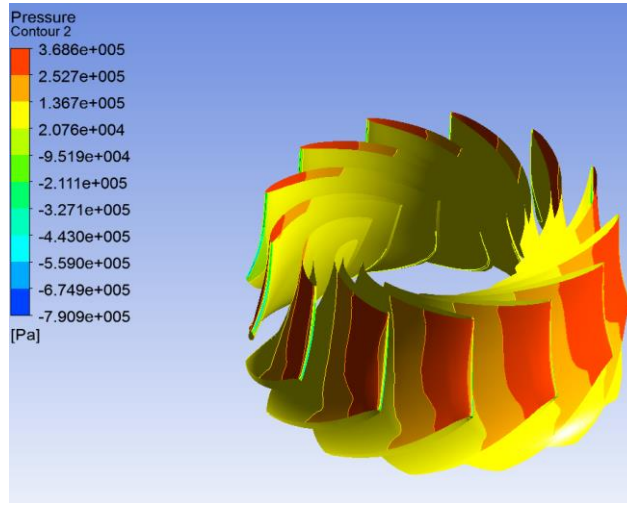
Şekil 21. Türbin Akış Hızı Dağılımı Önden Görünüm



Şekil 22. Türbin Akış Hızı Dağılımı Soldan Görünüm



Şekil 23. Türbin Basınç Dağılımı Önden Görünüm



Şekil 24. Çark Kanatları Basınç Dağılımı

5. Sonuç

Bu çalışmada, Bovet yöntemine göre tasarlanan küçük ölçekli bir Francis türbinin HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve verim değeri incelenmiştir. Bovet yöntemi çark tasarımı için deneysel bağlantıları kullanarak meridyenel düzlemde çark kanadı boyutlarını detaylı bir şekilde belirleyen bir yöntemdir. Bovet metodu ile kanat meridyenel profili elde edildikten sonra çark katı modeli oluşturulmuş ve çarkın verimliliğinin, basınç ve akış dağılımının, akış karakteristiklerinin hesaplanması için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir.

Günümüzde, HAD analizleri yüksek verimli çark tasarımı için pratik bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Türbin üreticileri HAD analizlerini, en güvenilir doğrulama yöntemi olan model türbin testleri ile doğrulamak zorundadırlar. Ancak, doğru metodolojiler ile oluşturulmuş olan güvenilir HAD analiz metodlarında model türbin testleri gerçekleştirilmeden türbin üreticileri tarafından kullanılmaktadır.

Çark için taahhüt edilen verim %92'ydi, fakat HAD analizleri sonucunda çark için %91,52 verim elde edilmiştir. Çark tasarımı gerçekleştirilirken kavitasyon oluşumu göz önünde bulundurulmalıdır. HAD sonuçlarına göre çark tasarımında yapılacak değişikliklerle kavitasyon bölgelerini gidermek mümkündür. Türbin için istenilen verim %90'dı, fakat HAD analizleri sonucunda türbin bileşenlerindeki kayıplardan kaynaklı olarak %88'lik verim değeri elde edilmiştir. Türbin HAD analizlerinde görüldüğü üzere çark üzerinde basıncın daha kademeli azalması için kanatlar üzerinde optimizasyon çalışması yapılması gerekmektedir. Emme borusundaki akışta oluşan bozulmaların düzeltilmesi gerekmektedir. Kavitasyon analizleri ile türbin üzerindeki oluşabilecek kavitasyon sorunlarının giderilmesi gerekmektedir. İlerleyen çalışmalarda tasarımdaki verim ile HAD analiz sonuçlarındaki verim arasındaki %2'lik fark çark ve diğer türbin bileşenleri üzerinde yapılacak optimizasyon çalışmaları ve kavitasyon incelemeleri sonucu yapılacak iyileştirmeler ile giderilecektir.

Teşekkürler

Bu çalışmaya yaptıkları katkılardan dolayı Arş. Gör. Eyup Koçak'a ve yüksek lisans öğrencisi olduğum Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği bölümüne teşekkürlerimi sunarım.

Referanslar

Ansyst Inc. , (2013). CFX Solver Theory Guide. Release; 15: 79-90

Bovet T. , (1963). Francis Tipi Bir Reaksiyon Türbininde Çark Kanadının Çizimi, Lozan Üniversitesi

ESHA- European Small Hydropower Association, Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant, (2004)

Ergin A. , (1972) Su Makinaları Ders Notları, İTÜ Makina Fakültesi

Haas R. , Hiebert M. , Hoatson E. , (2014). Francis Turbines, Fundamentals and Everything Else You Didn't Know That You Wanted To Know, Colorado State University, CIVE 401

Huang J. , Swiderski J. , Ji J. , Tung T. , Riley M. , (2006). Francis Turbine Upgrade for the Lushui Generating Station by Using Computational Fluid Dynamics - A Case Study

Krivchenko G.I. , (1983). Hydraulic Machines: Turbines and Pumps

Lain S. , Garcia M., Quintero B. , Orrego S. , (2010). CFD Numerical simulations of Francis turbines

Li J., WU Y., Liu S., Zhu Y, (2010). 3D Unsteady Turbulent Simulation of The Runaway Transient of The Francis Turbine

Neopane P.H. , Dahlhaug G.O. , Thapa B. , (2007). Alternative Design of a Francis Turbine for Sand Laden Water

Odesola I. F. , Oriabre J. I. , (2013). Development of a 5kW Francis Turbine Runner Using Computation Fluid Dynamics

Ruprecht, Heitele, Helmrich, (2014). Numerical Simulation of a Complete Francis Turbine including unsteady rotor/stator interactions

Teran L.A. , Larrahondo F.J. , Rodriguez S.A. , (2016). Performance improvement of a 500-kW Francis turbine based on CFD



The USGS Water Science School – Hydroelectric power water use <https://water.usgs.gov/edu/wuhy.html>

Wang L. , (2012). The Optimal Design based on CFD Combined with CAD for Turbine Runner



Perlit Esaslı Geopolimer Kompozitlere Kür Süresi ve Sıcaklığın Etkisi

Effect Of Curing Time and Temperature on Perlite-Based Geopolymer Composites

Selahattin Güzelkçük^{1,2} , İlhami Demir¹ 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

²Ahi Evran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 40100, Kırşehir, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 29/04/2019

Kabul/Accepted: 14/06/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Çimento üretimi esnasında dezavantaj olan CO₂ emisyonu ve yüksek enerji tüketiminin en aza indirilmesi amacı ile bu çalışmada perlit içeren geopolimer kompozitler üretilmiştir. Bu amaçla öğütülmüş perlit, sodyum hidroksit ile aktive edilerek, 50×50×50 mm boyutlarında çimentosuz perlit esaslı kompozit küp numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 24 ve 48 saatlik kür süresinde ve 90 °C ve 110 °C kür sıcaklığında olgunlaştırılmıştır. Karışımlar için en iyi kür süresi, çözeltinin NaOH molaritesi ve kür sıcaklığına bağlı olarak en yüksek basınç dayanımları belirlenmiştir. En iyi basınç dayanımı çözelti molaritesi 15,5 olan, 24 saat kür süresinde ve 110 °C kür sıcaklığında 46,76 MPa olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler

“Perlit, basınç dayanımı, geopolimer”

Abstract

In order to minimize the CO₂ emission and energy consumption, which are disadvantageous during the cement production, perlite-based composites was produced in this study. To this end, ground perlite was activated with sodium hydroxide and perlite-based cementless cubic composites with dimensions of 50 × 50 × 50 mm were produced. The produced samples were cured for 24 and 48 hours curing time at 90 °C and 110 °C curing temperature. The best curing time was determined according to NaOH molarity of the solution and curing temperature. The best compressive strength was determined as 46.76 MPa in perlite-based composites having 15,5 solution molarity, 24 hours curing time and at 110 °C curing temperature.

Key Words

“Perlite, compressive strength, geopolimer”

1.Giriş

Geopolimer beton üretiminin amacı; CO₂emissionunu, enerji tüketimini ve buna bağlı olarak çimento üretimi esnasında çevreye verilen olumsuz etkiyi en aza indirmektir. Bunun yanında perlit gibi ülkemizde ham madde kaynağı çok fazla olan ham perlitin kullanımını endüstriye kazandırmaktır. Perlitin volkanik bir mineral olması sebebi ile son zamanlarda yapılan çalışmalarda öğütülmüş perlitin özellikle puzolanik malzeme olarak kullanılabilmesi görülmektedir. (Yu, L. H. ve arkadaşları (2003)). Bu tür çalışmalar Türkiye'nin perlit kaynakları açısından zengin olması sebebi ile kullanım alanlarının genişletilmesi açısından önemlidir. (Onuncu Kalkınma Planı.(2014-2018)).

Alkali aktive ve alkalın bağlayıcıların uygulama alanları; Yapısal betonlar, duvar bloklar, beton kaldırımlar, beton büzler, elektrik direkleri, gaz beton, ısıya dayanıklı beton, petrol kuyuları, tehlikeli ve radyoaktif atıkların stabilizasyonu gerektiren betonlar, sulama sistemleri, dalgakıranlar, prefabrik ve yerinde bina inşaatları, döşemeler, temeller olarak sıralanmıştır (Shi, C.ve arkadaşları(2005)). Yapılan çalışmalarda aktivasyonunda en yaygın olarak kullanılan aktivatörler, sodyum veya potasyum hidroksit (POH, NaOH) ile cam suyu (Na₂SiO₃) veya potasyum cam suyu karışımıdır. (Baradan, B. ve arkadaşları (2012)). Geopolimerler, uçucu kül, kalsine edilmiş killer ve yüksek fırın cürufu gibi maddelerin, alkali aktivasyonu kullanılarak sentezlenen ve amorf alüminosilikatlerden oluşan son yıllarda kapsamlı olarak araştırılan yenilikçi bağlayıcılarıdır.(Ferone, C. ve arkadaşları (2013), Colangelo, F. ve arkadaşları(2017), Messina, F.ve arkadaşları(2015), Molino, B. ve arkadaşları (2014), Ferone, C. ve arkadaşları.(2015), Raphaeelle, P. ve arkadaşları (2016), Messina, F. ve arkadaşları (2017), Haha, M.B. ve arkadaşları(2011), Haha, M.B. ve arkadaşları (2012), İsmail,I. ve arkadaşları(2014)). Normal Portland çimentolu harçlarla kıyaslandığında, alkalilerle aktive edilmiş harçlar, düşük hidratasyon ısısına, yüksek erken mukavemete sahiptirler. (Sevim, O. ve arkadaşları (2017)). Tüm betonlarda olduğu gibi kür süresi ve sıcaklığı geopolimer betonlar için de önemli bir etkidir.(Chanh,N. V. ve arkadaşları (2008)).

Bu çalışmanın amacı, geopolimerler vasıtası ile çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonunu, enerji tüketimini ve buna bağlı olarak çimento üretimi esnasında çevreye verilen olumsuz etkiyi en aza indirmektir. Bunun yanında perlit gibi ülkemizde ham madde kaynağı çok fazla olan ham perlitin kullanımını endüstriye kazandırmaktır. Ayrıca; özellikle malzeme yataklarına yakın bölgelerde perlit kullanımını artırarak çimentoya alternatif bağlayıcılar ile geopolimer beton üretmektir.

2.Materyal Ve Metot

2.1. Materyal

2.1.1. Perlit

Çalışmada kullanılan ham perlit tozu dakikada 60 devir dönen bilyalı öğütücüde 60 dakika boyunca öğütülmüştür. Ham perlitin öğütülmeden önceki boyutları 0,60 mm ile 1,20 mm arasında olup ham perlit fabrikasından bu şekilde elde edilmiştir. Öğütülmüş perlitin yoğunluğu 1,95 gr/cm³tür.Karışımlarda kullanılan perlitin kimyasal özellikleri ve boyutsal özellikleri Tablo 1, Tablo 2 ve Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Toz Perlitin Kimyasal Özellikleri

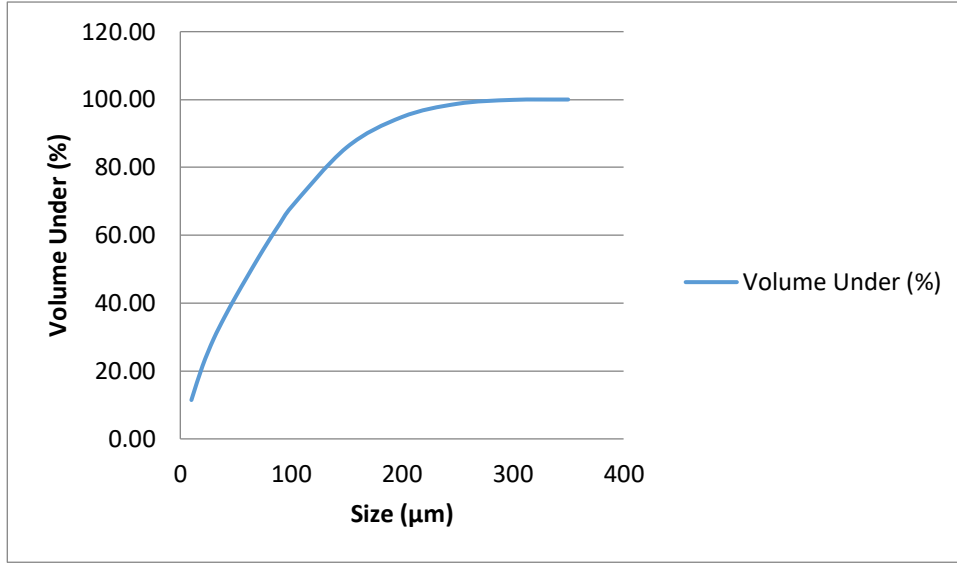
Kimyasal Bileşim	Yüzde (%)
CO ₂	0,03
Na ₂ O	3,63
Al ₂ O ₃	15,67
SiO ₂	73,86
P ₂ O ₅	0,29
SO ₃	0,11
K ₂ O	5,25
CaO	0,82
Fe ₂ O ₃	0,34

Tablo 2. Toz Perlitin Mastersize (Parçacık Boyut Analizi) Analizi

Size (µm)	Volume Under (%)
10	11,45
20	21,45
30	29,40
40	35,94

Tablo 2(Devam). Toz Perlitin Mastersize (Parçacık Boyut Analizi) Analizi

Size (μm)	Volume Under (%)
50	41,91
60	47,58
70	53,14
80	58,47
90	63,52
100	68,24
150	85,86
200	94,84
250	98,74
300	99,90
350	100

**Şekil 1.** TozPerlitin Mastersize Analizi

2.1.2. NaOH

NaOH alkali çözeltisi oluşturmak için kullanılan kimyasaldır. Minimum % 98 NaOH içermektedir.

2.1.3. CEN Referans Kumu

Çalışmada kullanılan standart kum Limak Trakya Çimento fabrikasında üretilen TS EN 196-1 standartlarında belirtilen CEN referans kumu olup tane dağılımı Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Referans kumunun tane dağılımı

Kare göz açıklığı (mm)	Yığılımlı kalan (%)
2.00	0
1.60	7 ± 5
1.00	33 ± 5
0.50	67 ± 5
0.16	87 ± 5
0.08	99 ± 1

2.1.4. Su

Çalışmada kullanılan su içme suyudur.

2.2. Metot

2.2.1. Harcın Hazırlanması ve Deney Numunelerinin Hazırlanması

Geopolimer kompozitlerde silis kaynağı olarak ham perlit çimento inceliğine getirilmiş ve bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Agregaya yerine standart kum, aktivatör olarak ise farklı miktarlarda sodyum hidroksit kullanılmıştır. Ayrıca çözeltilerdeki NaOH molariteleri sırası ile 7,7, 11,6 ve 15,5' tir. Oluşturulan geopolimer karışımlar ASTM C109' a göre, 50x50x50 mm boyutlarındaki harç kalıplarına dökülmüştür. Numunelere 24 ve 48 saat 90 °C'de ayrıca 24 ve 48 saat 110 °C'de iki farklı etüv kürü uygulanmıştır. Numunelerde basınç dayanımları incelenerek, dayanım açısından en uygun kür süresi, çözelti molaritesi ve kür sıcaklığı belirlenmiştir. Örneklerin adlandırılması Tablo 4, malzeme miktarları ise Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 4. Örneklerin Adlandırması

GeopolimerKarışım	Açıklama
90-7,7-24	90°C Kür sıcaklığı, 7,7 Molarite, Su/Bağlayıcı Oranı 0,45 ve 24 Saat Kür Süresi
90-7,7-48	90°C Kür sıcaklığı, 7,7 Molarite, Su/Bağlayıcı Oranı 0,45 ve 48 Saat Kür Süresi
90-11,6-24	90°CKür sıcaklığı, 11,6 Molarite, Su/Bağlayıcı Oranı 0,45 ve 24 Saat Kür Süresi
90-11,6-48	90°CKür sıcaklığı, 11,6 Molarite, Su/Bağlayıcı Oranı 0,45 ve 48 Saat Kür Süresi
90-15,5-24	90°C Kür sıcaklığı, 15,5 Molarite, Su/Bağlayıcı Oranı 0,45 ve 24 Saat Kür Süresi
90-15,5-48	90°C Kür sıcaklığı, 15,5 Molarite, Su/Bağlayıcı Oranı 0,45 ve 48 Saat Kür Süresi
110-7,7-24	110°C Kür sıcaklığı, 7,7 Molarite, Su/Bağlayıcı Oranı 0,45 ve 24 Saat Kür Süresi
110-7,7-48	110°C Kür sıcaklığı, 7,7 Molarite, Su/Bağlayıcı Oranı 0,45 ve 48 Saat Kür Süresi
110-11,6-24	110°C Kür sıcaklığı, 11,6 Molarite, Su/Bağlayıcı Oranı 0,45 ve 24 Saat Kür Süresi
110-11,6-48	110°C Kür sıcaklığı, 11,6 Molarite, Su/Bağlayıcı Oranı 0,45 ve 48 Saat Kür Süresi
110-15,5-24	110°C Kür sıcaklığı, 15,5 Molarite, Su/Bağlayıcı Oranı 0,45 ve 24 Saat Kür Süresi
110-15,5-48	110°C Kür sıcaklığı, 15,5 Molarite, Su/Bağlayıcı Oranı 0,45 ve 48 Saat Kür Süresi

Tablo 5. Malzeme Miktarları

Geopolimer Karışım	Sıcaklık	Kür Süresi		NaOH (Gr)	Bağlayıcı (Gr)	Standart Kum
		(Saat)	Molarite			
90-7,7-24	90	24	7,7	62,62	450	1350
90-7,7-48	90	48	7,7	62,62	450	1350
90-11,6-24	90	24	11,6	93,92	450	1350
90-11,6-48	90	48	11,6	93,92	450	1350
90-15,5-24	90	24	15,5	125,21	450	1350
90-15,5-48	90	48	15,5	125,21	450	1350
110-7,7-24	110	24	7,7	62,62	450	1350
110-7,7-48	110	48	7,7	62,62	450	1350
110-11,6-24	110	24	11,6	93,92	450	1350
110-11,6-48	110	48	11,6	93,92	450	1350
110-15,5-24	110	24	15,5	125,21	450	1350
110-15,5-48	110	48	15,5	125,21	450	1350

Örnekler adlandırılırken ilk verilen rakam kür sıcaklığını, ikinci verilen rakam çözeltideki NaOH molaritesini, üçüncü verilen rakam ise kür süresini ifade etmektedir.

2.2.3. Basınç Dayanım Testi

Basınç dayanım testleri ASTM C109' a göre 50x50x50 mm boyutunda küp numune kalıpları kullanılarak yapılmıştır.

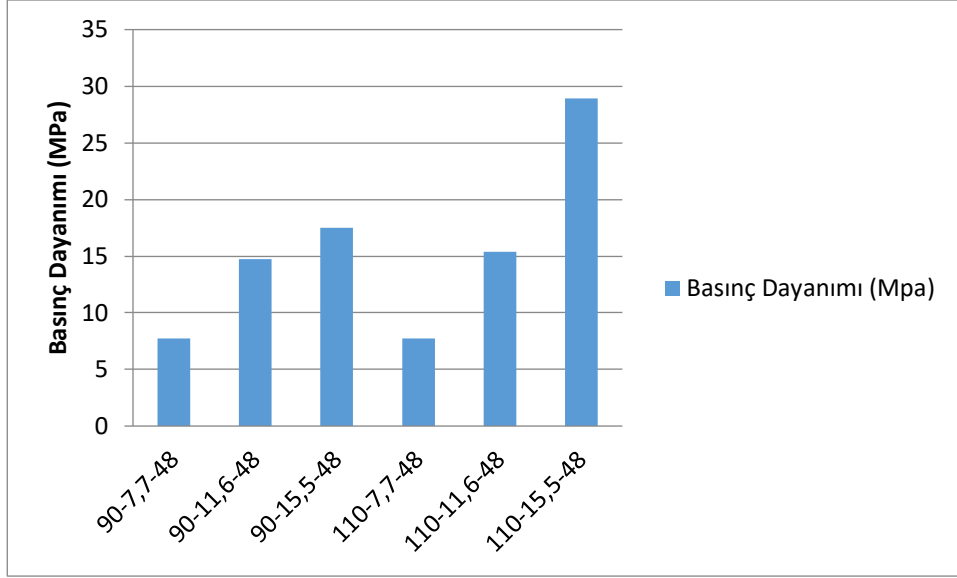
3. Bulgular

3.1. Etüvde 48 Saat Bekletilen Örneklerin Basınç Dayanımları

48 saat 90°C ve 110°C sıcaklıkta etüvde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri Tablo 6 ve Şekil 2' de verilmiştir.

Tablo 6. 48 saat etüv küründe bekletilen numunelerin basınç dayanımı karşılaştırması

Numune	Basınç Dayanımı (Mpa)
90-7,7-48	7,71
90-11,6-48	14,71
90-15,5-48	17,53
110-7,7-48	7,74
110-11,6-48	15,37
110-15,5-48	28,95

**Şekil 2.** 48 saat etüv küründe bekletilen numunelerin basınç dayanımı karşılaştırması

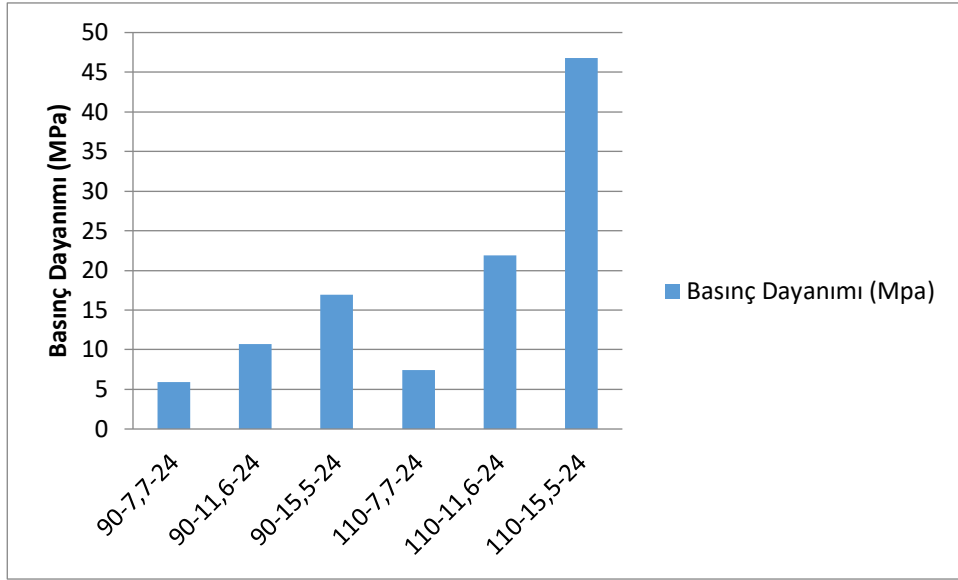
48 saat sonunda 90 °C kür sıcaklığında bekletilen ve çözüldüdeki NaOH molariteleri 7,7, 11,6, ve 15,5 olan numunelerin basınç dayanımları sırası ile; 7,71 MPa, 14,71 MPa ve 17,53 MPa olarak belirlenmiştir. 110 °C kür sıcaklığında bekletilen, numunelerin basınç dayanımları ise sırası ile; 7,74 MPa, 15,37 MPa ve 28,95 MPa olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak en iyi dayanımı 15,5 NaOH molaritesi ve 110°C kür sıcaklığında bekletilen numunelerde elde edilirken, en düşük dayanım ise 7,7 NaOH molaritesi ve 110°C kür sıcaklığında bekletilen numunelerde elde edilmiştir.

3.2. 24 Saat Etüvde Bekletilen Örneklerin Basınç Dayanımları

24 saat 90°C ve 110°C sıcaklıkta etüvde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri Tablo 7 ve Şekil 3' de verilmiştir.

Tablo 7. 24 saat etüv küründe bekletilen numunelerin basınç dayanımı karşılaştırması

Numune	Basınç Dayanımı (Mpa)
90-7,7-24	5,9
90-11,6-24	10,74
90-15,5-24	16,94
110-7,7-24	7,44
110-11,6-24	21,86
110-15,5-24	46,76



Şekil 3. 48saat etüv küründe bekletilen numunelerin basınç dayanımı karşılaştırması

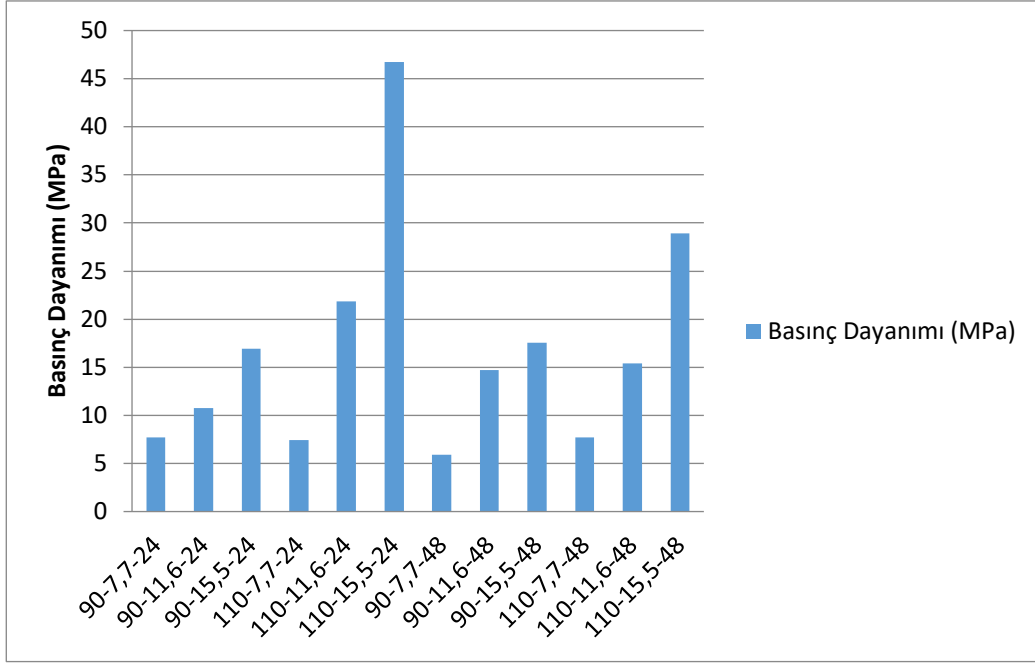
24 saat sonunda 90 °C kür sıcaklığında bekletilen, çözeltideki NaOH molariteleri 7,7, 11,6, ve 15,5 olan numunelerin basınç dayanımları sırası ile; 5,9 MPa, 10,74 MPa ve 16,94 MPa olarak belirlenmiştir. 110 °C kür sıcaklığında bekletilen numunelerin basınç dayanımları ise sırası ile; 7,44 MPa, 21,86 MPa ve 46,76 MPa olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak en iyi dayanımı 15,5 NaOH molaritesinde ve 110 °C kür sıcaklığında bekletilen numunelerde elde edilirken, en düşük dayanım ise 7,7 NaOH molaritesinde 90 °C kür sıcaklığında bekletilen numunelerde elde edilmiştir.

3.3. 24 ve 48 Saat Etüvde Bekletilen Örneklerin Basınç Dayanımlarının Karşılaştırılması

Su / Bağlayıcı oranı 0,45 ve çözeltideki NaOH molariteleri sırası ile 7,7, 11,6, ve 15,5 olan numuneler, 110 °C ve 90 °C kür sıcaklığında 24 ve 48 saat bekletilmiş olan numunelerin basınç dayanımları Tablo 8 ve Şekil 4' de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 8. 110 °C ve 90 °C kür sıcaklığı, çözelti molariteleri sırası ile 7,7, 11,6, ve 15,5 Su/Bağlayıcı Oranın 0,45 olan Numunelerin Basınç Dayanımı Karşılaştırması

Geopolimer Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)
90-7,7-24	7,71
90-11,6-24	10,74
90-15,5-24	16,94
110-7,7-24	7,44
110-11,6-24	21,86
110-15,5-24	46,76
90-7,7-48	5,90
90-11,6-48	14,71
90-15,5-48	17,53
110-7,7-48	7,74
110-11,6-48	15,37
110-15,5-48	28,95



Şekil 4. 110°C ve 90°C kür sıcaklığı, çözelti molariteleri sırası ile 7,7, 11,6, ve 15,5 Su/Bağlayıcı Oranın 0,45 olan Numunelerin Basınç Dayanımı Karşılaştırması

Bu deneysel çalışmada, 90 °C ve 110 °C'lik kür sıcaklıkları ile birlikte çözeltideki NaOH molariteleri sırası ile 7,7, 11,6, ve 15,5 olan sodyum hidroksit aktivatörü kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,45 olacak şekilde hazırlanan karışımlar 24 ve 48 saat süreyle kür edilmiştir. En iyi dayanımı veren karışım; 15,5 NaOH molaritesi, 24 saatlik kür süresinde ve 110 °C'de elde edilmiş olup bu değer 46,76 MPa olarak belirlenmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma sonucunda; kür sıcaklığının ve NaOH miktarının artırılması ile, basınç dayanımının yükseldiği belirlenmiştir. Daha önce yapılan literatür çalışmalarının da elde edilen sonuçları desteklediği görülmüştür. (Hardjito, D. ve arkadaşları (2004)), düşük kalsiyumlu uçucu kül için, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltilerinin kombinasyonunun iyi bir aktivatör olduğu ve daha yüksek sodyum hidroksit konsantrasyonları ve kür sıcaklığındaki artışla daha yüksek dayanım elde edilebileceği belirtmişlerdir. Diğer bir çalışmada, geopolimer betonlarda uçucu kül ilave oranının artması ile birlikte örneklerin basınç dayanımlarının arttığı tespit edilmiş, 60 °C'lik kür sıcaklığının uygulandığı % 40 uçucu kül ilaveli beton örneklerinde 30.1 MPa, 90 °C'lik kür uygulanan örneklerde ise yine % 40 uçucu kül ilaveli geopolimer betonlarında 31.4 MPa ile en yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. (Gümüş, A. ve arkadaşları(2016), Bakharev, T. ve arkadaşları(1999)). Kür sıcaklığındaki artış ile erken yaşlardaki dayanımların daha fazla artış gösterdiğini ve ilerleyen yaşlarda reaksiyon süresinin artması ile kür sıcaklığı artışının sonuç dayanımının azalmasına sebep olduğunu belirlemişlerdir.

Sonuç olarak; En iyi dayanımı veren karışım; 15,5 NaOH molaritesinde, 24 saatlik kür süresi ve 110 °C'de elde edilmiş olup bu değer 46,76 MPa olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda; 90 °C kür sıcaklığında 24 saatlik kür süresindeki numunelerin reaksiyonunun tamamlanmadığı buna bağlı olarak da 48 saat sonunda basınç dayanımının arttığı, 110 °C kür sıcaklığında ise 24 saatlik kür süresindeki numunelerin basınç dayanımının 48 saat sonundaki basınç dayanımlarından yüksek olduğu ve 110 °C'de beklenen numunelerin 24 saatlik kür süresi sonunda oluşan bağlara zarar verdiği ve basınç dayanımını düşürdüğü görülmüştür.

Referanslar

Gümüş A. (2016), Geopolimer Beton Özelliklerine Termal Kür Prosesinin Etkisi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

ASTM C109/ C109M Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)

Bakharev, T., Sanjayan, J. G., Cheng, Y. B., (1999), Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research*, 29, 113–120, doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00170-7

Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S. (2012), Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No:334, İzmir

Molino, B., Vincenzo, A.D., Ferone, C., Messina, F., Colangelo, F., Cioffi, R., (2015), Recycling of clay sediments for geopolimer binder production. A new perspective for reservoir management in the framework of Italian legislation: the Occhito reservoir case study, *Materials* 7.5603-5616, doi: 10.3390/ma7085603

- Caijun Shi, Della Roy, Pavel Krivenko. (2005). Alkali-Activated Cements and Concretes, (1 st ed.).
- Ferone, C., Colangelo, F., Messina, F., Santoro, L., Cioffi, R., (2013), Recycling of prewashed municipal solid waste incinerator fly ash in the manufacturing of low temperature setting geopolymer materials, *Materials* 6; 3420-3437
- C. Ferone, C., Liguori, B., Capasso, I., Colangelo, F., Cioffi, R., Cappelletto, E., Maggio, R. D. (2015), Thermally treated clay sediments as geopolymer source material, *Appl. Clay Sci.* 107.195-204, doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.027
- Colangelo, F., Cioffi, R., Roviello, G., Capasso, I., Caputo, D., Aprea, P., Liguori, B., Ferone, C., (2017), Thermal cycling stability of fly ash based geopolymer mortars, *Compos. Part B* 129 .11-17, doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.029
- Messina, F., Ferone, C., Colangelo, F., Cioffi, R., (2015), Low temperature alkaline activation of weathered fly ash: influence of mineral admixtures on early age performance, *Constr. Build. Mater* 86.169-177, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.069
- Messina, F., Ferone, C., Molino, A., Roviello, G., Colangelo, F., Molino, B., Cioffi, R., (2017), Synergistic recycling of calcined clayey sediments and water potabilization sludge as geopolymer precursors: upscaling from binders to precast paving cement-free bricks, *Constr. Build. Mater.* 133.14-26, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.039
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J. ve Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*, 101 (6), 467-472.
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., Nicolas, R. S., Hamdan, S. Deventer, J. S. V., (2014) . Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash, *Cem. Concr. Compos.* 45 ,125-135, doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.006
- Yu, L.-H., Ou, H., Lee, L.-L., (2003), *Cement And Concrete Research*, 33; 73-76
- Haha, M. B., Lothenbach, B., Le Saout, G. L., Winnefeld, F., (2011), Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag Part I: effect of MgO, *Cem. Concr. Res.* 41 (9). 955-963.
- Haha, M. B., Lothenbach, B., Le Saout, G. L., Winnefeld, F., (2012) Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag Part II: effect of Al₂O₃, *Cem. Concr. Res.* 42 (1).74-83.
- Chanh, N. V., Trung, B. D., Tuan, D. V., (2008), Recent research geopolymer concrete., in: *The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA, Vietnam*, pp. 11-13.
- Onuncu Kalkınma Planı (2014-2018), Madencilik Politikaları Özel İhtisas Komisyonu Raporu
- P. Raphaelle, P., Martin, C., (2016), Formulation and performance of flash metakaolin geopolymer concretes, *Constr. Build. Mater.* 120.150-160.
- Sevim O, Filazi A, Toprak B, Kartal S. (2017). Investigating of Mechanical Properties of Mortars Based on Fly Ash and Blast Furnace Slag Activated with Alkali, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)* [Vol-4, Issue-2.
- TS EN 196-1, Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini, TSE, (2002).



Nokta Bulutu Verileri Kullanarak Tarihi Edirne Mihalbey Hamamı'nın Farklı Modellerle İrdelenmesi

Examine of Historical Edirne Mihalbey Public Bath With Different Models By Using Point Cloud Data

Yusuf Demirel¹, Fatih Aydoğmuş¹

¹Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06570 Ankara, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 30/04/2019

Kabul/Accepted: 31/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Bu çalışmada Edirne ilinde bulunan 15. Yüzyıl yapılarından Mihalbey hamamının mevcut durumunu irdelemesinde iki farklı model kullanılması amaçlanmıştır. Klasik ve voksel modelleme yöntemi altında sayısal analizi yapılmıştır. Bu amaçla klasik modellemede; nokta bulutu verileri üzerinden rölöve ve klasik taşıyıcı sistem oluşturulmuştur. Ölü yükler sisteme etkilmiştir. Voksel modellemede ise rölöveye ihtiyaç duyulmadan, nokta bulutu verileri dâhilinde tüm yapı ve ölü yükler küp eleman olarak tanımlanmış ve davranışa dâhil edilmiştir.

Klasik modelleme ile voksel modelleme yöntemi SAP2000 programı ile analiz edilmiştir. Analiz öncesi, analiz aşaması ve analiz sonrası verileri değerlendirilmiştir.

Voksel modele ait analiz sonuçları, klasik modelleme tekniği kullanılarak elde edilen değerlerle karşılaştırılmış ve iki modelleme sisteminin avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Tarihi yapılar, Nokta Bulutu, Voksel Modelleme, Sismik Davranış, Edirne Mihalbey Hamamı"

Abstract

This study employs two different models to examine the present status of the 15th century Mihalbey Public Bath in Edirne. Numerical analysis was performed using classical and voxel modeling methods. For this purpose, in classical modeling; the survey and point cloud data were used to build a structural system. Dead loads were added to the system. In the voxel modeling, all structure and dead loads were defined as cube elements without the need for a survey.

Classical modeling and voxel modeling were analyzed in SAP2000 program. Before the analysis, the analysis phase and post-analysis data were evaluated.

Analysis results of the voxel model, classical modeling technique was compared with the obtained values and the advantages and disadvantages of two models were evaluated.

Key Words

"Historical buildings, Point Cloud, Voxel Modeling, Seismic Behavior, Edirne Mihalbey Turkish Bath"

1. Giriş

Tarihi yapılarda çekme ve eğilme taşıyan yapı elemanı bulunmamaktadır. Bunun nedeni çekme kuvvetini alan donatının ve bağlayıcı malzemelerin (beton gibi) bulunmamasıdır. Tarihi yapıların taşıyıcı sisteminin modellenmesi oldukça zor ve titiz bir çalışma gerektirmektedir. Bu tür taşıyıcı sisteme sahip yapıların hem yapısal hem de eleman bazında davranışını yorumlayabilmek günümüz mühendisleri için oldukça zordur. Bunun nedeni, günümüz yapılarında betonarme ve çelik yapıların etkin olması ve mühendislik eğitiminde basınç etkin yığma yapılar üzerinde yeterince durulmamasıdır. Bu durum, mevcut tarihi yapıların değerlendirilmesinde farklı sonuçların ve değerlendirmelerin çıkmasına neden olmaktadır.

Nokta bulutu saha ölçümlerinde kullanılan lazer tarayıcıyla elde edilen üç boyutlu koordinatlı nokta kümesidir. TLS (Terrestrial laser scanner- Karasal lazer tarayıcı) kısa adıyla anılan bu cihazlar optik bir cihazlardır.

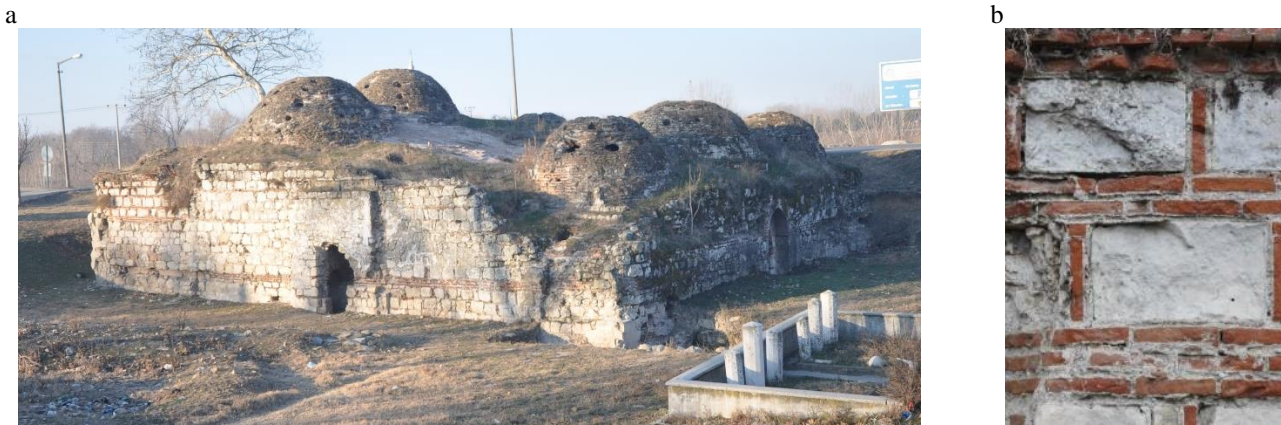
Gönderilen lazer ışınların yüzeylerden yansmasıyla yöneltilen yüzeye ait gerçek zamanlı nokta kümeleri oluşturmaktadır. Prensip olarak lazer ışınlarının yatay ve düşey doğrultularda 360 derece tarayacak şekilde gönderilmesiyle ölçülen mesafe ve açı değerleri anlık olarak kodlanarak elde edilen polar koordinatlar (r, θ, β) , kartezyen koordinatlara (x, y, z) dönüştürülmektedir. Tarihi yapılarda, iç ve dış mekânların birçok noktasından elde edilen nokta bulutlarının birleştirilmesi sonucu mevcut yapının iç ve dış koordinat sistemleri detaylı olarak elde edilebilmektedir. Nokta bulutu verilerinden yapısal model oluşturmak için geçerli olan iki modelleme tekniği mevcuttur. Bu yöntemler; ağ oluşturma (mesh generation) yöntemi ve Voksel (voxelization) yöntemleridir.

Ağ oluşturma yönteminde; nokta bulutunda oluşturulan koordinat verileri veya yüksek çözünürlüklü fotoğraflar derlenerek yapının yüzey geometrisi oluşturulur. Bu aşamada gereksiz nokta koordinatları ayıklanır. Oluşturulan ağ sistemi, rölöveye dönüştürülür ve mühendislik önsezisi ile tahmin edilen yapı taşıyıcı sistemi dâhilinde eleman ve kesit boyutu tanımlanır. Bu yapı taşıyıcı sistemi sonlu elemanlar programlarına yönlendirilerek tarihi yapı analiz edilmeye çalışılır (Alicandro, 2017) (Castellazzi, ve diğerleri, 2016) (Cardani & Angjeliu, 2016) (Manich, ve diğerleri, 2016). Bu tip modellemelere klasik modelleme adı verilebilir.

Veri alınımı ve bilgisayar kapasitesinin artması sonucu farklı modelleme tekniklerinin klasik modellemenin yerini alması doğaldır. Voksel modelleme tekniği bunlardan biridir. Voksel; bir pikselin üç boyutlu karşılığıdır. Piksel, bir noktayı iki boyutlu olarak tanımlarken voksel bir noktayı üç boyutlu uzayda tanımlayan grafik bilgisini ifade etmektedir (Giordano, Mele, & De Luca, 2002) (Castellazzi, D'Altri, Miranda, & Ubertaini, 2016) (Roca, Cervera, Gariup, & Pela, 2010) (Castellazzi, D'Altri, Bitelli, Selvaggi, & Lambertini, 2015)

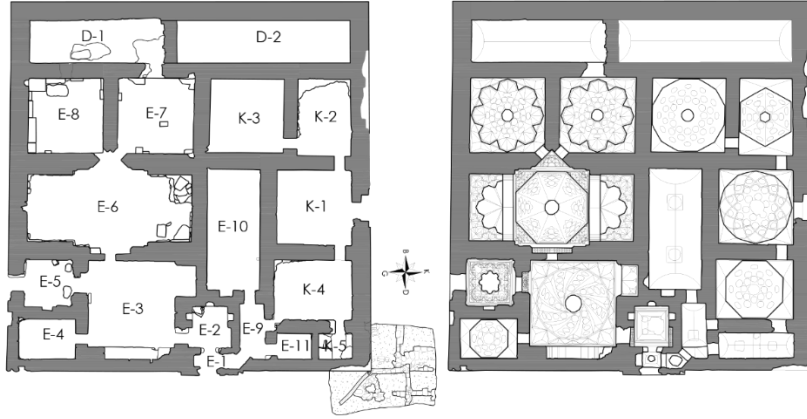
2. Yapısal Modellemeler ve Analiz Sonuçlarının Tartışılması

Klasik ve voksel modellemelere referans olan Tarihi Edirne Mihalbey Hamam'ı, Tunca nehri üzerindeki Gâzi Mihâl Bey köprüsünün kuzeydoğu köşesinde yer almakta olup Şahmelek Câmî'nin karşısındadır. Tarihi kayıtlar incelendiğinde hamamın 15. Yüzyılın ilk çeyreğinde inşa ettirildiğini tahmin edilmektedir (Asır Proje Arşivi, 2017). Dıştan dışa 22,70x23,20 metre ebadındaki eser, doğu-batı doğrultusunda uzanan dikdörtgene yakın bir plana sahiptir (Şekil 1, Şekil 2).



Şekil 1. (a) Hamam genel görünüm; (b) Duvar örgüsü

Kâgir malzemedan yığma tekniğinde inşa edilen yapıda (Şekil 1a); kesme yonu moloz taş, tuğla, mermer, alçı, kireç harcı kullanılmıştır. Yapının beden duvarları; kesme, yontu ve moloz taş sırası arasına ikişer-üçer sıra şeklinde tuğla hatılların atıldığı almaşık duvar tekniğinde oluşturulmuştur (Şekil 1b). Cephelerde tuğla hatıllar arasında kalan yontu ve kesme taşlar, her biri arasına birer dikey tuğla ile kasetlenerek mozaik görüntüsü oluşturmuştur. Beden duvarlarında kullanılan malzeme ve teknik, aynı şekilde kubbelerin poligonol formlu kasnaklarında da tekrarlandığı görülmektedir. Yapının kâgir malzemeli duvar örgüsünde, üst örtüde ve zemin döşemesinde birleştirici unsur olarak kireç harcın kullanıldığı görülmektedir.



Şekil 2. Hamam mekanları iz düşüm planı ve tavan planı

Yapının tüm bölümleri için kullanılan tüm yapı malzemelerinin mekanik değerlerinin bilinmesi neredeyse imkânsızdır. Diğer taraftan bilgisayar modelinin karmaşıklığı arttıkça verilerin doğru bir şekilde girilmesi ve analiz sonuçlarının değerlendirilmesi de zorlaşmaktadır. Bu zorluklardan ötürü yeterli malzeme deneyinin yapılabildiği küçük ölçekli yapılar dışında duvar yapısını homojen izotropik bir model olarak hesaba alan makro modelleme tekniği daha uygun bir çözüm olarak görülmektedir (Giordano, Mele, & De Luca, 2002).

Hamam yapısının geometrisinin belirlenmesi için içeriden ve dışarıdan toplamda 67 farklı noktada lazer ölçümü yapılmıştır. Lazer tarayıcının 360 derece tarama verileri alınmış, modelleme aşamasında gerekli olmayacak noktalar buluttan silinerek, modelleme için gerekli nokta bulutu ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen yapının 20 milyon noktadan oluşan nokta bulutu görüntüsü Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. 20 milyon noktadan oluşmuş nokta bulutu görüntüsü

Çalışmada, makro modelleme tekniği kullanılarak iki farklı yöntemle analiz modeli oluşturulmuştur. Analizlerde kullanılan malzemelere ait değerler Tablo 1'de verilmiştir (Magenes & Penna, 2009).

Tablo 1: Kullanılan malzemeler

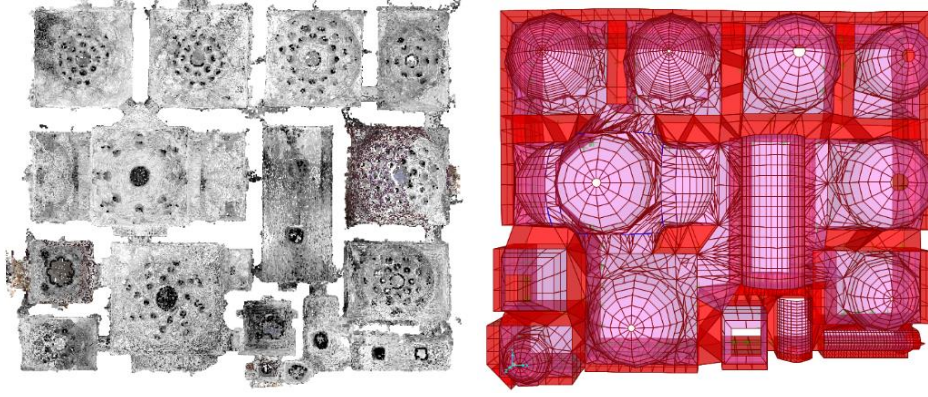
Eleman Türü	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Elastisite Modülü (MPa)	Basınç dayanımı (MPa)
Kubbeler	18	1900	1.8
Taş Kemerler	21	1600	1.5
Duvarlar	21	1750	1.6

Klasik analiz modelinde nokta bulutundan elde edilen rölöveden yapı geometrisi ve kalınlıklar, mühendislik (bu analizde biz) tecrübeleri dâhilinde değerlendirilerek yapı taşıyıcı sistemi elemanları taşıyıcı duvar, kemer, kubbe, tonozlar oluşturulmuştur. Bu modelde kubbe ve pandantif elemanlar için kabuk (Shell) kullanılırken, yapı duvarlar için katı (solid) elemanlar kullanılmıştır. Ayrıca yüklemeler ve yükler yine tecrübe ve bilgi dâhilinde belirlenerek modele etki edilmiştir.

Nokta bulutu verilerinden görüntülenebilen iç ve dış kabuk geometrilerinden hareketle; kubbe, tonoz, kemer, geçiş elemanları (pandantifler) ve duvar kesitlerinin merkezleri tespit edilerek üç boyutlu yapı taşıyıcı sistem iskeleti oluşturulmuştur. Oluşturulan iskelet Sap2000 programına aktarılarak kabuk, çubuk veya katı geometriye sahip yapı elemanlarının modellenmesi sağlanmıştır. Nokta bulutu verilerinin yapının gerçek geometrisine yakın modellemede oldukça etkili bir veri olduğu söylenebilir. Şekil 4a'da iç mekân ölçümlerinden oluşan yapı nokta bulutu görüntüsü, Şekil 4b'de ise Sap 2000'ne girilen yapı elemanları ve görüntüleri verilmektedir.

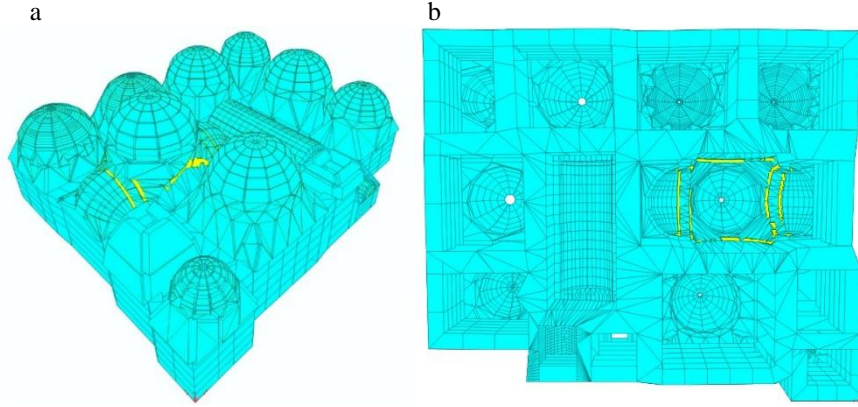
a

b



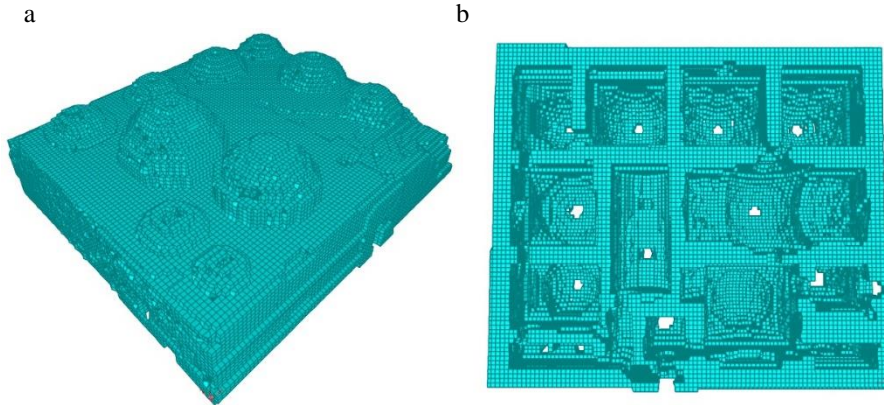
Şekil 4. (a) Nokta Bulutu üst görünüş, (b) Sap2000 modeli üst görünüş

Yapıyı oluşturan duvarlar Sap2000 modeli için idealize edilerek farklı kalınlıkları göz önüne alınmıştır. Bu sebeple beden duvarları 75-120 cm arası, tuğla kubbelerde 33-47 cm arası, ara duvarlarda ise en kalını 150 cm, en incisi 45 cm olmak dokuz farklı kalınlık kullanılmıştır. Duvarlar katı (solid) eleman, kubbeler ve pandantifler düzlem (Shell) eleman ve kemerler çubuk (frame) eleman olarak tanımlanmıştır. Yapı modeli 3d ve alt görünüşü Şekil 5a ve Şekil 5b'de verilmiştir. Bu modellemede 94 çubuk, 2443 plak ve 483 katı eleman olmak üzere toplam 3020 elemandan oluşan yapı sistemi kullanılmıştır.



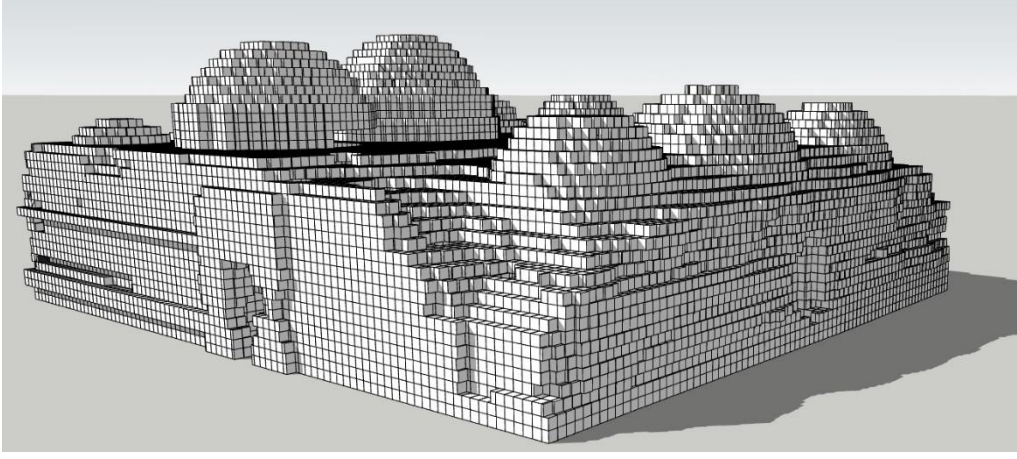
Şekil 5. (a) Sap modeli 3d görünüş (b) Sap modeli alt görünüş

İkinci modelleme tekniği olarak kullanılan voksel modellemede ise sadece nokta bulutu verileri kullanılarak yapı geometrisi oluşturulmuştur. Küp formunda yapı elemanlarından yapı taşıyıcı sistemi ve düşey yükleri oluşturulabilmektedir. Bu çalışmada $25 \times 25 \times 25 \text{ cm}^3$ hacimli katı (solid) elemanlarla modelleme yapılmıştır. Toplamı yapı yüksekliğine tekabül edecek, plan düzleminde 25 cm. 'lik 35 adet katmandan oluşan yapı voksel modeli elde edilmiştir (Şekil 6a-b). Bu modelleme için toplamda 63144 küp eleman kullanılmıştır.



Şekil 6. (a) Voksel Sap modeli 3d görünüş (b) Voksel Sap modeli alt görünüş

Voksel modelde ait birim küp boyutları tüm analiz için veya bölgesel olarak değiştirilebilir. Şekil 7'de voksel modele ait üç boyutlu görünüş verilmektedir. Hamam yapısının modelleme detaylarını göstermek amacıyla hamamın voksel modellemedeki görünüşüne benzer açıdan çekilmiş fotoğrafı Şekil 8'de verilmiştir. Ancak yapı üzerindeki zamanla oluşan dolgunun ölü yüklemesi voksel modelinde gösterilmemiştir.

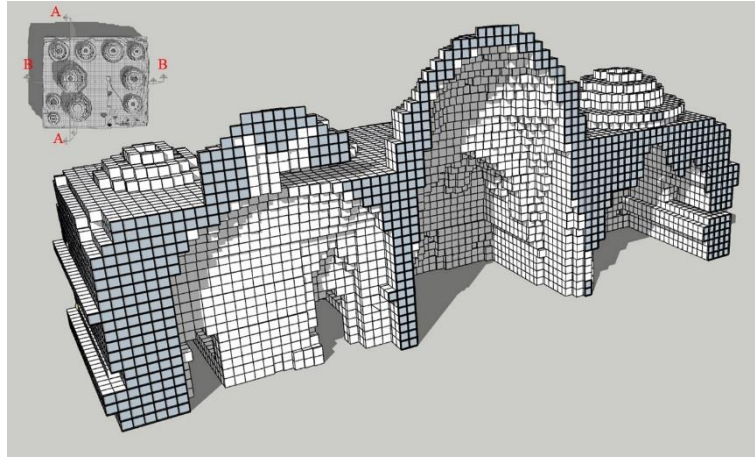


Şekil 7. Voxel model üç boyutlu görünüş

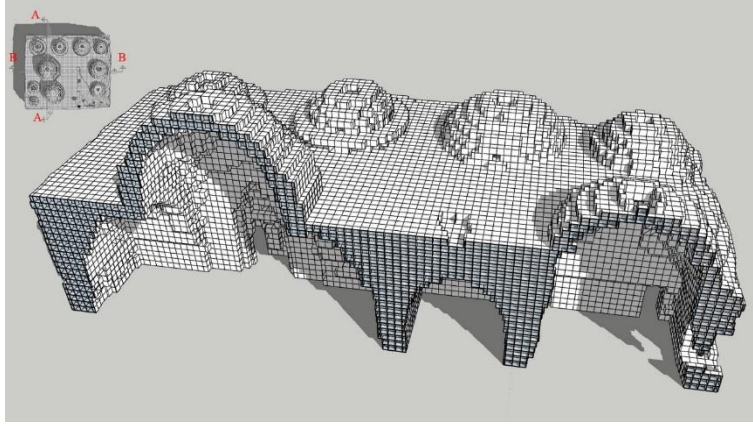


Şekil 8. Mihalbey hamamı kuzeydoğu köşesi görünüş

İçeriden ve dışarıdan olmak üzere 67 noktadan alınan nokta bulutu verilerinin rölyöve çalışmasına gereksinin duyulmadan voxel modelde değerlendirilmesi sonucu yapının iç ve dış kısımlarını gösteren A-A düşey kesit Şekil 9 ve B-B yatay kesit Şekil 10'da verilmiştir. Bu modelleme sayesinde yapıda çubuk eleman, plak veya katı eleman tanımlaması yapılmadan tüm yapı davranışa dâhil edilmiştir.



Şekil 9. Voxel model A-A kesiti perspektif görünüş



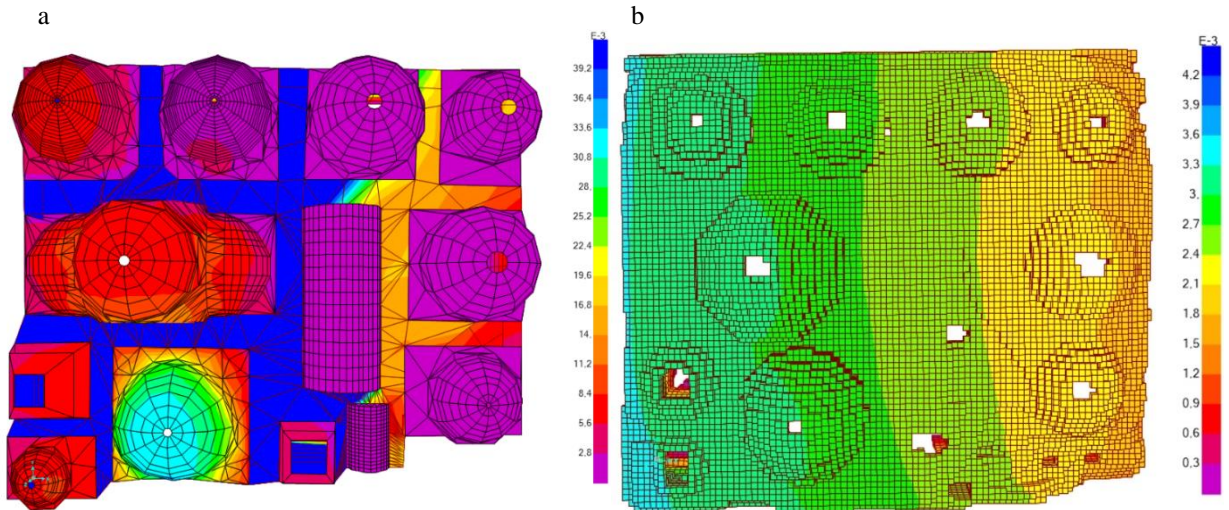
Şekil 10. Voksel model B-B kesiti perspektif görünüş

Yapının her iki yöntemle analizi için; Edirne depremselliği ve yapının bulunduğu zemin koşulları göz önüne alınmıştır. Yapıda zemin ve deprem parametreleri olarak maksimum yer ivmesi 0,10g ve kısa periyot 0,20 sn. uzun periyot 0,90 sn. olmak üzere zemin sınıfı Z4 zemin için değerler kullanılmıştır.

Her iki model için, deprem yükleri belirlenirken bina önem katsayısı $I=1,0$ olarak alınmıştır. Deprem analizleri için spektrum katsayısı yığma yapılar için önerildiği üzere 2,5 olarak kabul edilmiştir (DBYBHY, 2007). Spektrum değerleri 4.derece deprem bölgesi ve Z4 zemin sınıfı için tanımlanmıştır. Sistemde ölü yüklerin ve yapı elemanların zati ağırlıklarını dikkate alınmıştır. Bu ölü yük, üst döşemedeki 80 cm kalınlığında dolgunun yükünü ifade etmektedir. Plak ve çubuk elemanlarla oluşturulan klasik modelde, dolgu yükleri sisteme $1,25 \text{ t/m}^2$ olarak etkilmiştir. Voksel modelde ise dolgu alanı ve yoğunluğu tanımlandığı için buna ihtiyaç duyulmamıştır. Taşıyıcı sistem davranış katsayısı $R=2$ olarak dikkate alınmıştır. Yapısal analizlerde mod birleştirme yöntemi kullanılmıştır.

Her iki modellemede de kayma gerilmeleri 0,10 MPa olarak alınmıştır. Duvar kayma dayanımını (τ) bulmak için başlangıç kayma dayanımına duvara etkiyen normal gerilmenin (σ) katkısı eklenmektedir, Oluşan eksenel gerilme değeri 0.15 MPa mertebesindedir. Duvar kayma dayanımı; $\tau=\tau_0+0,4\sigma$ ise $\tau=0,10+0,4 \times 0,15=0,16 \text{ MPa}$ 'dır. Yapılan hesaplamalarda yapı ağırlığı klasik analiz modeli için 2130,0 ton, voksel modeli için ise 1902,5 ton olarak bulunmuştur. İlk üç mod için toplam ötelenmeler, Klasik model ve voksel model için görsel karşılaştırma amacıyla aşağıda verilmiştir.

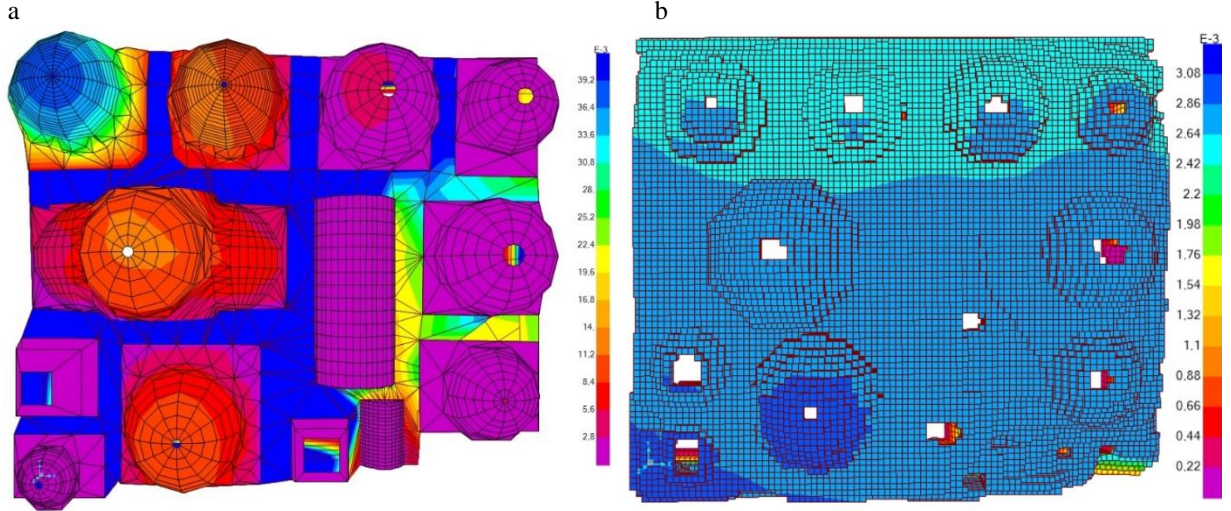
Mod 1'de klasik model yapı periyodu 0,086 sn.ve voksel model yapı periyodu 1,623 sn.dir. Klasik model yapı periyodu voksel modele göre %94 daha kısadır. Klasik model mod 1 için belirleyici unsur E3 kubbesi ile K2, K1, K4 bölümlerine ait üst örtü ve duvarlar olurken voksel modelde yapının X yönünde tüm kütlelerinin 1. moda etkin olduğu görülmüştür. Klasik modelde maksimum toplam yer değiştirme 39 mm. iken voksel modelde maksimum yer değiştirme 4 mm. olarak bulunmuştur. Klasik modelde yer değiştirmelerin voksel modele oranla 9-10 kat daha fazla oluşmasının sebebi de toplam yer değiştirmenin E3 kubbesi üzerinde hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Mod 1 için voksel model beklenen yapı davranışına daha yakın sonuçlar vermiştir (Şekil 11).



Şekil 11. (a) Klasik model 1.mod (min. 0 m /maks.0.039m) (b)Voksel model 1.mod (min. 0 m / maks.0.004 m)

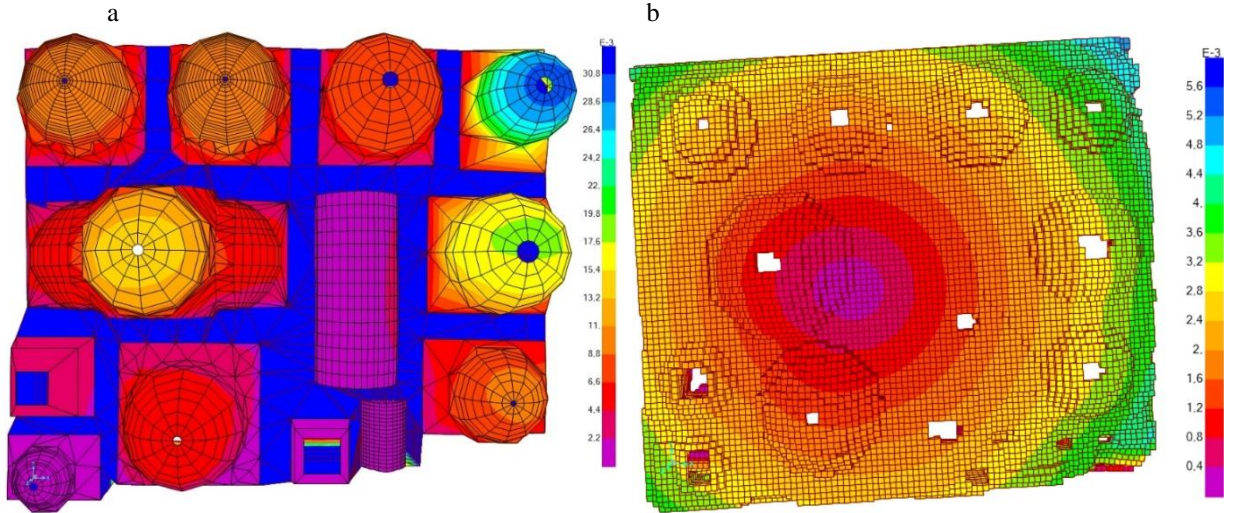
Mod 2'de klasik model yapı periyodu 0,081 sn.ve voksel model yapı periyodu 1,507 sn.dir. Klasik model yapı periyodu voksel model yapı periyoduna göre %94 daha kısadır. Klasik model 2. modu için belirleyici unsur E8 kubbesi ile K1, K4 ait üst örtü ve duvarları olurken voksel modelde yapının Y yönünde tüm kütlelerinin 2. moda etkin olduğu görülmüştür. Klasik modelde maksimum toplam yer değiştirme 40 mm. iken voksel modelde maksimum yer değiştirme 3 mm. olarak bulunmuştur. Klasik modelde yer

değiştirmelerin, voksel modele oranla 13 kat daha fazla oluşmasının sebebi de toplam yer değiştirmenin E8 kubbesi üzerinde hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Mod 2 için voksel beklenen yapı davranışına daha yakın sonuçlar vermiştir (şekil 12).



şekil 12. (a) Klasik model 2.mod (min. 0 m / maks.0.04 m) (b)Voksel model 2.mod (min. 0 m / maks.0.003 m)

Mod 3'de klasik model yapı periyodu 0,078 sn.ve voksel model yapı periyodu 1,297 sn.dir. Klasik model yapı periyodu voksel model yapı periyoduna göre %94 daha kısadır. Klasik model mod 3 için belirleyici unsur K2 olurken, voksel modelde yapının Z yönünde tüm kütesinin 1. moda etkin olduğu görülmüştür. Klasik modelde maksimum toplam yer değiştirme 31 mm. iken voksel modelde maksimum yer değiştirme 5 mm. olarak bulunmuştur. Klasik modelde yer değiştirmelerin voksel modele oranla 6 kat daha fazla oluşmasının sebebi de toplam yer değiştirmenin K2 kubbesi üzerinde hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Mod 3 için voksel model beklenen yapı davranışına daha yakın sonuçlar vermiştir (şekil 13).



şekil 13. (a) Klasik model 3.mod (min. 0 m / maks.0.031 m) (b)Voksel model 3.mod (min. 0 m / maks.0.005 m)

Modal analiz sonucunda hesaplanan modal kütle katılım oranları Tablo 1'de verilmiştir.

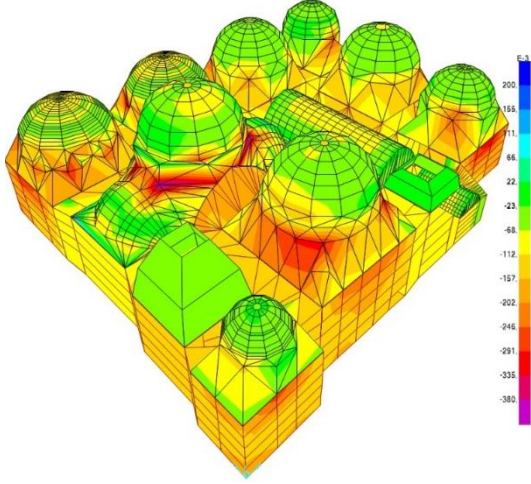
Tablo 1: Modal analiz kütle katılım oranları (%)

Yön	Klasik model kütle katılım oranı (%)		Voksel model kütle katılım oranı(%)	
	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik
UX	97,75	81,71	99,61	88,64
UY	97,10	79,11	99,63	88,18
UZ	81,04	54,18	99,16	87,73

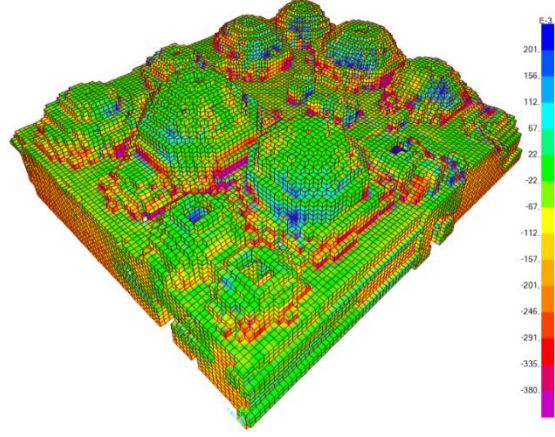
Yapının zati ağırlığı ve hareketli yüklerin etkisi ile düşey taşıyıcılarını teşkil eden beden duvarlarında oluşan aksenal gerilmeler ile kubbe ve tonozlarda oluşan gerilmeler klasik model için şekil 14a'da, voksel model için ise şekil 14b'de gösterilmiştir. Gerilme dağılımı her iki modelde paralellik gösterse de özellikle kubbe-duvar geçiş elemanlarında (pandantiflerde) klasik modele ait sonuçlarda gerilme yığılımlarının daha fazla oluştuğu görülmüştür. Klasik modelde E3 kubbesi pandantiflerinde oluşan aksenal gerilme değeri 0,29 MPa iken aynı bölge için voksel modelde oluşan aksenal gerilme değeri 0,21 MPa'dır. Yapı modellemesine genel olarak bakıldığında klasik modelde pandantif ve duvarlarda oluşan gerilmeler 0,07-0,16 MPa aralığında iken voksel modelde 0,02-0,11 MPa

arasında oluşmaktadır. Bu durum her iki modelin gerilme renk ölçeğinde de görülmektedir. Ortalama gerilme klasik modele göre vokal modelde %60 daha düşüktür.

a



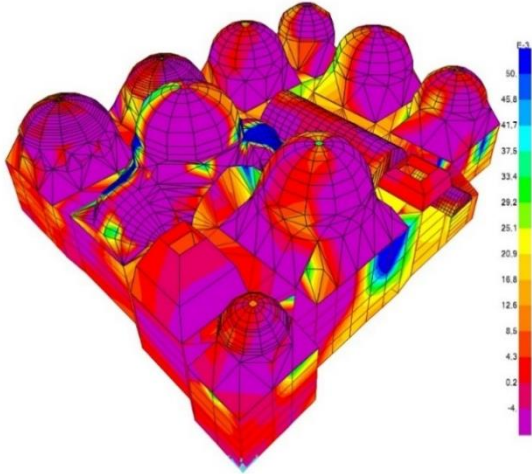
b



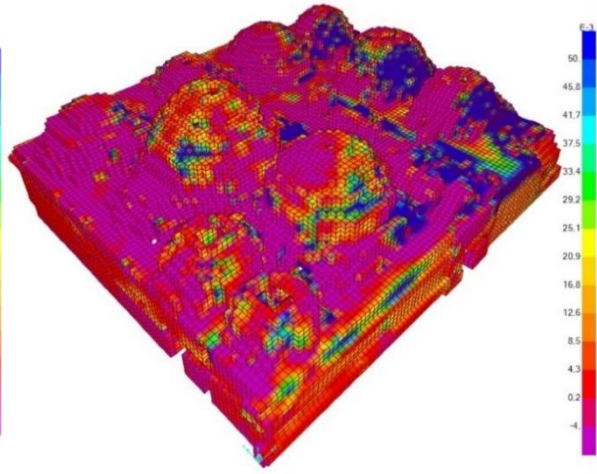
Şekil 14. (a)Klasik model (b)Voksel model G+Q yüklemesi eksenel gerilmeler (MPa)

X yönündeki deprem etkisi altında, G+Q+Ex yüklemesi, analiz sonucunda yapı elemanlarında oluşan kayma gerilmesi değerleri klasik model için Şekil 15a'da, vokal model için Şekil 15b'de verilmiştir. Oluşan kayma gerilmeleri klasik modelde maksimum 0,59 MPa iken vokal modelde 1.01 MPa olarak hesaplanmıştır. Klasik model için X yönü deprem etkisinde hesaplanan kayma gerilmesi değeri vokal modele oranla %41 daha düşüktür.

a



b

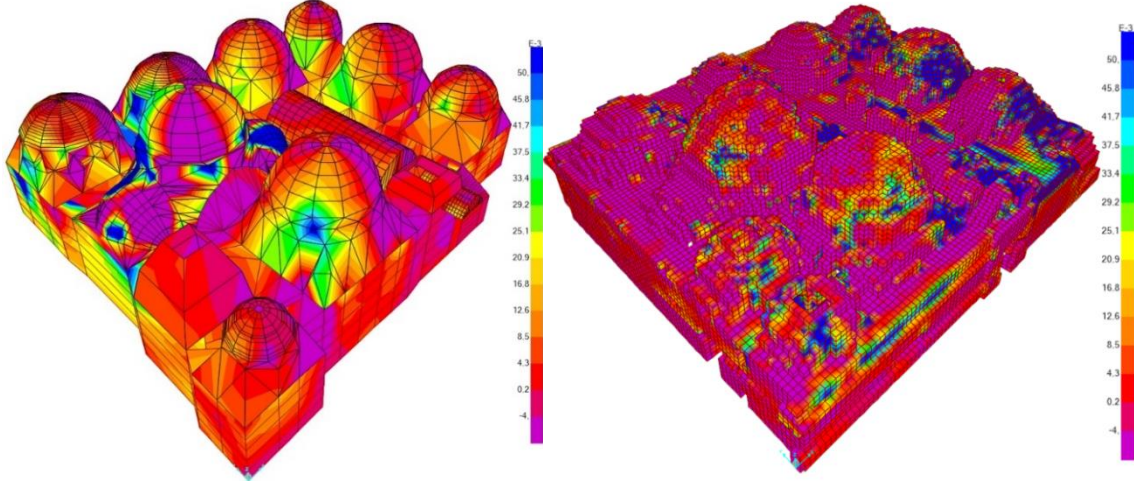


Şekil 15. (a)Klasik model (b)Voksel model G+0.6Q+EX yüklemesi kayma gerilmeleri (MPa)

Y yönündeki deprem etkisi altında, G+Q+Ey yüklemesi, analiz sonucunda yapı elemanlarında oluşan kayma gerilmesi değerleri klasik model için Şekil 16a'da, vokal model için Şekil 16b'de verilmiştir. Oluşan kayma gerilmeleri klasik modelde maksimum 0,62 MPa iken vokal modelde 1.04 MPa olarak hesaplanmıştır. Klasik model için X yönü deprem etkisinde hesaplanan kayma gerilmesi değeri vokal modele oranla %40 daha düşüktür.

a

b



Şekil 16. (a)Klasik model (b)Voksel model G+0.6Q+EY yüklemesi kayma gerilmeleri (MPa)

Taş duvarlar için verilen başlangıç kayma dayanımı değerinin duvar örgüsü, duvar tipolojisi, işçilik ve malzeme kalitesi gibi parametreleri detaylı olarak yansıtmadığı ve ancak fikir verici temsili değerler olarak değerlendirilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

Yapı kütlesi incelendiğinde klasik model 2130,0 ton, voksel model 1902,5 ton olarak bulunmuştur. Klasik modelde yapı kütlesi için hesaba dâhil edilen dolgu yüklerinin modele ek üniform yayılı yük olarak girilmiştir. Voksel modelde böyle bir uygulama olmakla birlikte dolgu alanları üç boyutlu olarak yapı geometrisi oluşturulurken belirlenmekte ve yapı modeline dâhil edilmektedir. Bu nedenle yapı ağırlığı ve yükleri mevcut yapı ve yüklere daha yakındır.

İki farklı teknikte üretilmiş yapı modelleri karşılaştırıldığında, klasik yapı elemanlarından oluşan modelin ilk üç periyodu 0,086-0,081-0,078 sn. mertebesinde iken, voksel tekniği ile üretilen modelin ilk üç modunun 1,623-1,507-1,297 sn. mertebesinde oluşmuştur. Klasik model, voksel modele göre daha rijit davranış göstermiştir.

Klasik model, katı duvarlara mesnetlenmiş farklı kalınlıklardaki plak elemanlardan oluşmaktadır. Voksel model tüm elemanlarının katı eleman olarak modellenmesiyle oluşturulmuştur. Bu sebeple klasik modelde belirleyici unsur plak elemanlardan oluşan kubbelerdir. Voksel model elemanları arasında tam uyum söz konusu olduğundan yapının tüm geometrisi modları belirlemektedir. Yapı modlarına ait toplam yer değiştirme grafikleri incelendiğinde klasik modelde oluşan modal yer değiştirmelerin kubbelerle sınırlı kaldığı tüm yapıyı etkilemediği görülmüştür. Voksel modelde oluşan yer değiştirmelerinde yapının tümünün davranışa katıldığı görülmüştür.

Modal analizlerinde gerekli kütle katılım oranlarının sağlanabilmesi için klasik modelde dinamik analizde 60 adet mod çözümü yapılarak kütle katılım oranları %81 mertebesine getirilirken, voksel modelde ilk 20 modda kütle katılım oranını %88'e ulaştırılmıştır.

3. Sonuçlar

Klasik modelde, yapı elemanlarının tanımlanabilmesi için, rölöve çizimlerinden yararlanılarak duvar, kubbe, tonoz gibi taşıyıcı elemanlardan sistem model oluşturulmuştur. Voksel modelde, nokta bulutu verileri kullanılarak tüm yapı, istenilen boyutta küp birim elemanlarla oluşturulmuştur. Bu nedenle, voksel modellemede rölöve çizimlerine ihtiyaç yoktur.

Klasik modelde, yapı davranışı ve elemanlarının tanımlanması mühendislik yorumuna açıktır. Voksel modelde tüm yapı tek bir kütle olarak davranışa katılmaktadır. Bu nedenle mevcut yığma yapının gerçek davranışına daha yakın sonuçlar sunduğu düşünülebilir.

Klasik modelde yapı kemer, tonoz ve kubbeleri, kalınlıkları sabit elemanlarla oluşturulur. Voksel model en kesit kalınlığı değişken elemanların tanımlanabilmesi daha kolaydır. Bu sebepten dolayı elde edilen gerilme değerlerinin aynı bölgeler için klasik modelde voksel modele oranla daha yüksek gerilmeler oluşturduğu görülmüştür.

Mevcut yapıdaki kubbe ve tonoz gibi eğrisel yüzeye sahip elemanların ana yapıya bağlantısını sağlayan geçiş elemanları, voksel modelde gerçek boyut ve kütlesi ile tanımlanabilmektedir. Bu nedenle, bu geçiş elemanlarının yapıya ve kubbeye bağlantıları gerçeğe daha yakın modellenebilmektedir.

Klasik model ve voksel model ortalama gerilme dağılımları benzerlik göstermekle birlikte, gerilme değerlerinde farklılıklar mevcuttur. Klasik modelde maksimum aksenal gerilmeler voksel modele oranla %60 düşük çıkmıştır. Klasik modelde maksimum kayma gerilmeleri voksel modele oranla %40 düşük çıkmıştır. Klasik modelde gerilme yığılımları voksel modele oranla daha

fazladır. Bunun sebebi, klasik modeldeki eleman tanımlamaları ve birleşimleridir. Voksel model eleman bazında çözümlene olmadığı için daha üniform gerilme dağılımı göstermektedir.

Klasik modelde, yapı modlarını tanımlamada kubbeler etkin iken voksel modelde tüm yapı geometrisi modları tanımlar. Bu sebeple klasik model voksel modele oranla 3 kat daha fazla modlu çözüm gerektirir. Klasik modelde yapı periyotları voksel modele göre %94 daha kısadır. Klasik modelde ilk üç mod için yer değiştirmeler voksel modele göre ortalama 9-10 kat daha fazladır.

Yapılacak modellemelerde, yapı davranışında önemli görülen bölgelerin, model küp boyutlarının değiştirilerek daha ayrıntılı sonuçlar elde edilmesi mümkün olabilir.

Tarihi yapı modellemelerde yapının gerçek davranışına yaklaşabilmek için yapı malzemeleri ve birleşim elemanlarının mekanik özelliklerinin analizine önem verilmelidir.

Referanslar

Alicandro, M. (2017). Optimization and Automation of The Post-Processing High Resolution UAV Photogrammetric Data. *Ricerche di Geomatica*, 25-34.

Asır Poje Arşivi (2017). Edirne – Merkez Gâzi Mihâl Bey Hamamı Sanat Tarihi Raporu. T.C. BAŞBAKANLIK VAKIFLAR GENEL MÜDÜRLÜĞÜ, Edirne Vakıflar Bölge Müdürlüğü, EDİRNE.

Cardani, G., & Angjeliu, G. (2016). Challenges from building information modeling to finite element analysis of existing buildings. *Structural Analysis of Historical Constructions Anamnesis, diagnosis, therapy, controls* (s. 120-124). içinde London: Taylor&Francis Group.

Castellazzi, G., D'Altri, A. M., Bitelli, G., Selvaggi, I., & Lambertini, A. (2015). From laser scanning to finite element analysis of complex buildings by using a semi-automatic procedure. *sensors*. http://amsacta.unibo.it/4246/1/Castellazzi_sensors-87308_submitted.pdf adresinden alındı

Castellazzi, G., D'Altri, A. M., Miranda, S., Ubertini, F., Bitelli, G., Lambertini, A., . . . Tralli, A. (2016, 06 5-10). A Mesh Generation Method For Historical Monumental Buildings: An Innovative Approach. Ferrara, Italy: ECCOMAS Congress 2016 VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering.

Castellazzi, G., D'Altri, A. M., Miranda, S. d., & Ubertini, F. (2016). An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings. *Engineering Structures*.

DBYBHY. (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Ankara: Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.

Giordano, A., Mele, E., & De Luca, A. (2002, 01 28). Modelling of historical masonry structures: comparison of different approaches through a case study. *Engineering Structures* 24 (2002) 1057–1069.

Magenes, G., & Penna, P. (2009). Existing Masonry Buildings: General Code Issues And Methods Of Analysis And Assessment. Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop, (s. 185-198). Napoli, Italy.



Manich, C. G., Kelman, T., Coutts, F., Qiu, P., Murray, P., Longo, C. G., & Marshall, S. (2016). Exploring the use of image processing to survey and quantitatively assess historic buildings. *Structural Analysis of Historical Constructions Anamnesis, diagnosis, therapy, controls* (s. 125-132). içinde London: Taylor&Francis Group.

Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., & Pela, L. (2010). Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. *Classical And Advanced Approaches. Arch Comput Methods Eng*, 299-325.



Kırıkkale Çoruhözü Deresi'nde Bir Boyutlu Taşkın Modellemesi

One Dimensional Flood Flow Modelling In The Kırıkkale Çoruhözü Stream

Ali Doğu¹ , Osman Yıldız¹ 

¹Kırıkkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 17/05/2019

Kabul/Accepted: 05/06/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Bu çalışmada, Kırıkkale il sınırları içerisinde bulunan Kızılırmak nehrinin yan kolu Çoruhözü Deresi'nde bir boyutlu taşkın modellemesi yapılmıştır. Bu amaçla, dere havzasının DSİ Sentetik ve Mockus yöntemleriyle sentetik birim hidrografları elde edildikten sonra Kırıkkale Meteoroloji İstasyonu'nda 2015 yılına kadar ölçülen yağış verileri kullanılarak çeşitli tekerrür süreleri için taşkın pik debileri hesaplanmıştır. Derenin 1999 yılında DSİ tarafından ıslah edilen Kırıkkale kent merkezinden geçen 8 km'lik kısımdaki beton kaplamalı kesitlerin, bu çalışmada elde edilen 500 ve 1000 yıllık taşkın pik debileri için yeterli olup olmadığı HEC-RAS programı kullanılarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; mevcut kesitlerin göz önüne alınan taşkın pik debileri için yetersiz olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“Yağış, Taşkın pik debisi, Çoruhözü deresi, HEC-RAS, DSİ Sentetik Metodu, Mockus Metodu.”

Abstract

In this study, a one-dimensional flood flow modelling for the Çoruhözü stream, a tributary of the Kızılırmak River, was performed. For this purpose, synthetic unit hydrographs in the stream basin by the DSİ synthetic and Mockus methods were first obtained utilizing the recent precipitation data from the Kırıkkale Meteorology Station until 2015. Then, flood peaks were calculated for different return periods. The 8-km stream section restored by DSİ in 1999 was modelled by HEC-RAS in order to investigate whether it is capable of carrying the 500 and 1000 year flood peaks. As the study result indicate the current cross-sections are unfortunately unable to pass the given flood discharges under consideration.

Key Words

“Precipitation, Flood peak discharge, Çoruhözü stream, HEC-RAS, DSİ Synthetic Method, Mockus Method.”

1. Giriş

Yağmur ve kar erimesi gibi hidrolojik olaylar sebebiyle akarsular ana mecrasından taşarak civarındaki tarım, hayvancılık, ulaşım, barınma ve sanayi için kullanılan arazi ve yapıları tahrip edebilmekte, buraları kullanan kişilerin can ve mal kayıpları yaşamalarına neden olabilmektedir. Hava olaylarının belirli bir düzende meydana gelmemesi, bu hava olaylarının sonucunda gözlemlenecek taşkınların da ne zaman ve ne büyüklükte oluşacağını belirsizleştirir. Taşkınların yaşamsal faaliyetler üzerinde doğrudan çok büyük etkide bulunması potansiyel bir taşkın özelliğini öngörebilme ve gerekli tedbirlerin planlanması ihtiyacı doğurmaktadır (Doğu, 2016).

Son yıllarda literatürde uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile entegre halde HEC-RAS kullanılarak birçok akarsu taşkın modellemesi çalışması sunulmuştur. Kara (2009), yapay kanal düzeneğinde beş farklı debi geçmesi durumunda meydana gelen su yüzeyi profillerini, HEC-RAS yazılımı yardımıyla elde ettikleriyle mukayese etmiş ve aralarında uyum olduğu sonucuna varmıştır. Ackerman vd. (2009), göz önüne aldıkları çalışma alanında daha önceki taşkın verilerini kullanarak su seviyelerini belirlemeyi hedefledikleri çalışmada, HEC-RAS modelinin doğruluğunu göstermeyi amaçlamışlar ve modelden elde edilen sonuçların taşkın tahmininde ve yerleşim yeri planlamasında kullanılabileceği sonucuna varmışlardır. Onuşuel Gül ve Gül (2010), HEC-HMS ile İzmir Bostanlı havzası için elde ettikleri taşkın hidrograflarını kullanarak HEC-GeoRAS ve HEC-RAS yardımıyla yaptıkları modelleme çalışmasında bölgedeki taşkın tedbirlerinin yeterli olup olmadığını araştırmıştır. Uçar (2010), Trabzon Değirmendere havzasının arazi modelini ArcGIS ile oluşturarak HEC-RAS ile hidrolik analizler yapmış ve istatistiksel yöntemlerle elde ettiği muhtelif tekerrüre sahip debiler için taşkın risk haritaları üretmiştir. Çitgez (2011), taşkınların sık gözlemlendiği Batı Karadeniz bölümünde bulunan Kaynaşlı ve Kurur dere havzalarındaki taşkın analizi çalışmasında, HEC-RAS programını CBS ile entegre ederek Kaynaşlı deresini modellemiş ve 100 yıl tekerrürlü taşkın debisinin kesitlerden güvenle geçemediğini göstermiştir. Tuncer (2011), İstanbul Nakkaş Deresi'ni incelediği çalışmasında, HEC-RAS ile elde ettiği model sonuçlarını Excel programı yardımıyla elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmış ve uygulama alanında tasarlanan kaplamalı trapez kanalın su seviyeleri için yeterli olduğunu göstermiştir. Şahin vd. (2013), Kıbrıs Güzelyurt'ta meydana gelen taşkınları inceledikleri çalışmada, HEC-RAS yardımıyla Bostancı ve Fabrika derelerini modelleyerek taşkın önleyici tedbirler önermişlerdir. Efe (2014), Batman çayının Yeni Malabadi Köprüsü ile Diyarbakır-Batman Karayolu Köprüsü arasındaki kesiminde HEC-RAS yardımıyla bir boyutlu modelleme çalışması yaparak taşkın alanlarını göstermiştir. Üyükülüoğlu (2015), Manavgat ilçesi Ilıca deresinin taşkın yayılabilirliği yerleri göstermek için HEC-RAS ile modelleme yapmıştır. Türkkan ve Korkmaz (2015), Bursa Kaplıkaya deresinde taşkın durumunu belirlemek için HEC-RAS yazılımını kullanmıştır. Eren vd. (2015), HEC-RAS ile modelleme yaparak Silivri Kayalı (Boğluca) deresinin taşkın riskini irdelemiştir. Ünsal vd. (2016), Kılavuzlu Barajı sulama kanalını HEC-RAS kullanarak modelleyerek projedeki değerlerle modeldeki derinlik değerlerinin arasında uyum olduğu sonucuna varmıştır. Ersoy (2017), HEC-RAS ile modellemesini yaptığı Manisa'nın Yunusemre ilçesinde yer alan Kızıldere deresinin taşkın yayılım alanlarını belirlemiştir. Oğraş (2018), Dicle Nehri'nin Diyarbakır'daki belirli bir kesiminde yaptığı çalışmasında HEC-RAS programını kullanarak çeşitli tekerrürlü taşkınların etkileyebileceği alanlarını göstermiştir. Üçüncü (2018), HEC-RAS programını kullanarak Kırıkkale Bahşılı'da Karadere ve Hodar dereleri için hesapladığı taşkın pik debilerinin, mevcut kaplamalı kesitlerden geçip geçemeyeceğini araştırmıştır. Çeliker (2018), HEC-RAS yazılımını CBS ile entegre ederek Bingöl kent merkezinden geçen Çapakçur, Gayt ve Göynük çaylarının çeşitli tekerrürlü taşkınlar için taşkın yayılım alanlarını belirlemiştir.

İç Anadolu Bölgesi'nin coğrafi ve iklimsel özelliklerine bağlı olarak Kırıkkale'de yaz aylarında konvektif yağışlar sıkça meydana gelmektedir. 1999, 2014 ve 2015 yıllarında yaz aylarında (Haziran-Ağustos dönemi) görülen konvektif yağışlar sonucu Kırıkkale 8şehir merkezinden geçen derelerde yaşanan taşkın ve seller önemli can ve mal kayıplarına sebep olmuştur (Duvan, 2016). Kırıkkale il merkezinden geçen Kızılırmak Nehri'nin yan kolu Çoruhözü deresinin 18.07.1999 tarihinde akşam saatlerinde meydana gelen şiddetli yağışa bağlı olarak taşması sonucu 4 kişi hayatını kaybetmiştir. Dere etrafında bulunan Mustafa Keskin Caddesi, Kafkas Caddesi, Yeşilöz Caddesi başta olmak üzere Sanayi, Gündoğdu ve Bahçelievler mahallelerinde ciddi miktarda maddi hasar meydana gelmiştir (Kırıkkale AFAD, 1999). Bu olayı müteakiben, DSİ 5. Bölge Müdürlüğü tarafından derenin ıslah edilmesi ve etrafında bulunan alanların taşkınlardan korunması için derenin 8 km'lik bölümüne beton kaplamalı kanal inşası projesi gerçekleştirilmiştir (DSİ, 1999).

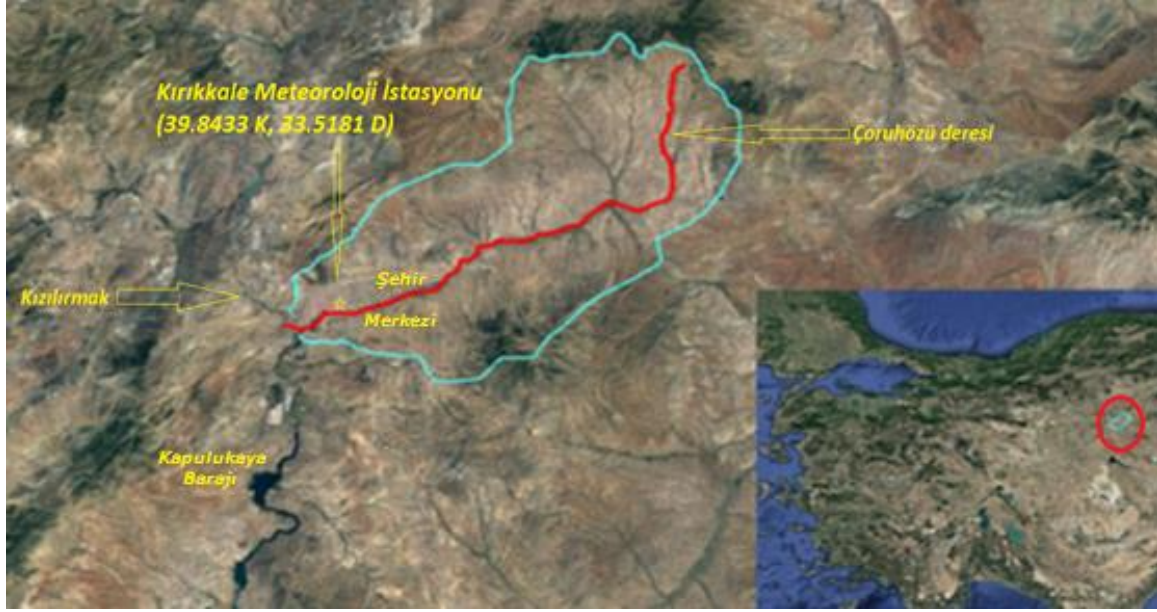
Bu çalışmanın amacı, akım gözlemleri yapılmayan Çoruhözü deresi üzerinde 1999 yılında DSİ tarafından inşa edilen kanal kesitlerinin, Kırıkkale Meteoroloji İstasyonu'ndan temin edilen güncel yağış verileri kullanılarak hesaplanan 500 ve 1000 yıllık tekerrüre sahip taşkın pik debileri (Q_{500} ve Q_{1000}) için yeterli olup olmadığının araştırılmasıdır. Bu amaçla, belirlenen tekerrür süreleri için taşkın pik debilerinin tahmininde DSİ Sentetik ve Mockus yöntemleri ile elde edilen sentetik birim hidrograflar kullanılmıştır. HEC-RAS yazılımı kullanılarak kanalın bir boyutlu hidrolik modellemesi ile 500 ve 1000 yıllık taşkın debilerine ait su yüzeyi profilleri elde edilerek analizler gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışmaya konu olan Çoruhözü deresi havzası, Kızılırmak Havzası'nda yer alan bir alt havzadır (Şekil 1). Balışeyh ilçesine bağlı İzzettin köyü civarında doğan derenin su toplama alanı yaklaşık olarak 692 km² olarak hesaplanmıştır. En düşük kotu 678 m olarak belirlenen havzanın yaklaşık 115 km²'si ova hüviyetinde olup havza yamaçları genel itibarıyla orta eğimlidir. Havzanın kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda Koçubaba Dağı ve güney-güneydoğu doğrultusunda Denek Dağı bulunmaktadır. Ana kol uzunluğu yaklaşık olarak 62 km olarak belirlenen derenin yatak malzemesi genel olarak sert toprak ve iri kum şeklinde sınıflandırılmıştır. Havzada bulunan ana kayayı arkoz, kuvarsit ve olivinli serpantinler meydana getirmektedir. Zayıf organik madde ve yüksek kireç muhtevisi havza toprağı, ağır bünyeli kumlu kil toprağı olup ovada derin, yamaçlarda ise sığdır. Çalışma

sahasında tipik İç Anadolu iklimi gözlenmektedir. Yazların sıcak, kışların ise soğuk yaşandığı bölgeye en çok yağışın düştüğü mevsim ilkbahardır.



Şekil 1. Çoruhözü deresi havzasına ait uydu görüntüsü.

2.2. Yağış Verisi

Bu çalışmada, Kırıkkale Meteoroloji İstasyonu'ndan temin edilen 2015 yılına kadar olan standart zamanlarda gözlenen en büyük yağış değerleri verileri kullanılarak DSİ Sentetik ve Mockus yöntemleri ile taşkın pik debileri tahmin edilmiştir. Yağış verileri üzerinde yapılan incelemede, DSİ tarafından hazırlanan projede kullanılan yağış verileri (1967-1996 yıllarına ait) ile daha güncel kayıtları içeren bu çalışmada kullanılan yağış verileri (1967-2015 yıllarına ait) arasında önemli farklılıklar bulunduğu gözlenmiştir (Tablo 1 ve 2). Tablo 2'de görüldüğü gibi tekerrür yılı arttıkça, verilen yağış süreleri için yağış yüksekliklerinde çok belirgin artışlar olduğu görülmektedir.

Tablo 1. DSİ raporuna temel teşkil eden yağış yükseklikleri (mm) (1967-1996).

Saat	Tekerrür Yılı				
	5	10	25	50	100
1	21.13	23.19	25.22	26.42	27.42
2	23.35	25.63	27.87	29.21	30.31
4	25.94	28.48	30.99	32.45	33.68
6	27.80	30.52	33.18	34.76	36.08
8	29.66	32.55	35.39	37.08	38.49
12	30.77	33.77	36.72	38.47	39.93
18	32.99	36.21	39.37	41.25	42.82
24	37.07	40.69	44.24	46.36	48.11

Tablo 2. Kırıkkale Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen yağış verileri (mm) (1967-2015).

Saat	Tekerrür Yılı				
	5	10	25	50	100
1	22.85	30.53	42.25	52.60	64.43
2	25.01	32.55	43.91	53.84	65.13
4	27.14	35.28	48.23	60.17	74.34
6	28.69	36.97	50.16	62.29	75.43
8	30.05	38.39	51.59	63.63	75.73
12	31.23	39.42	52.35	64.15	76.68
18	32.87	41.16	53.82	65.07	77.86
24	37.60	45.16	56.03	65.13	78.03

2.3. Taşkın Pik Debilerinin Hesaplanması

Akım gözlem verisi bulunmayan akarsularda birim hidrografın elde edilmesi için genellikle sentetik yöntemlere başvurulmaktadır. Bu çalışmada, akım gözlemleri bulunmayan Çoruhözü deresinin Kızılırmak nehri ile birleştiği noktadaki birim hidrografın elde edilmesinde Türkiye'de en yaygın olarak kullanılan DSİ sentetik ve Mockus yöntemleri tercih edilmiştir. Bunların ilki olan DSİ

sentetik metot, 1000 km²'ye kadar olan havzalar için kullanılmaktadır. Mockus metodu ise hesabının kolaylığı ve hidrografın üçgen biçimli olması sebebiyle tercih edilmektedir. Bu yöntem toplanma zamanı 30 saate kadar olan havzalarda kullanılmakta olup eğrisel hidrograflar kadar hassas sonuçlar vermektedir. Her iki yöntem için de geçerli olmak üzere, büyük alanlı havzalarda alt havzalar için elde edilen birim hidrograflar geciktirme zamanlarına göre süperpoze edilerek havzanın birim hidrografı elde edilir (Özdemir, 1978).

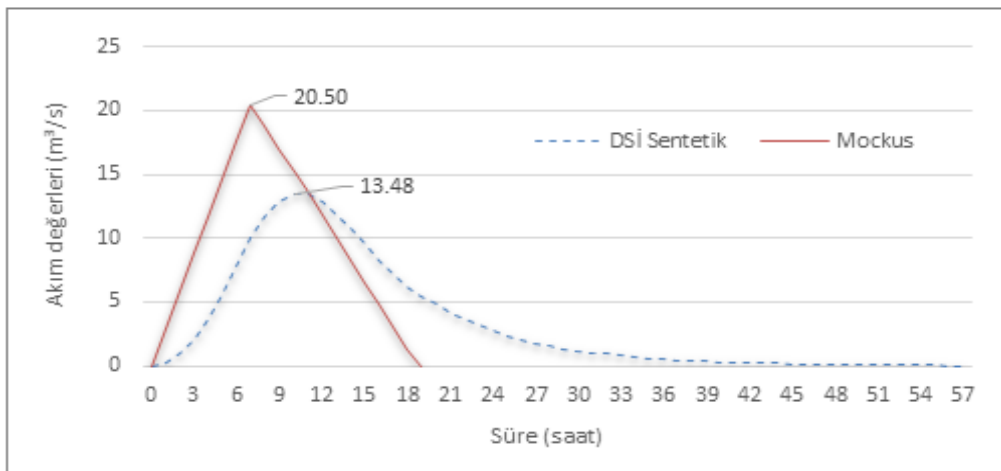
Bu çalışmada göz önüne alınan Çoruhözü deresi havzasının sentetik birim hidrografının hesabında kullanılmak üzere gerekli olan havza ve akarsuya ait veriler Tablo 3'de verilmiştir. Burada A, havza alanı; L, en uzun akarsu boyu; L_c, havza ağırlık merkezinin akarsu üzerindeki izdüşümün akarsu çıkış noktasına olan uzaklığı; S, havzanın harmonik eğimi; K, Mockus metodu pik debi parametresi ve T_c, havza toplanma süresi olup Denklem 1 ile elde edilmiştir. Çoruhözü havza alanı 1000 km²'den küçük olduğu için ve nispeten düşük bir toplanma zamanına sahip olduğu için birim hidrografın hesabında havzayı alt havzalara ayırmaya gerek kalmamıştır.

$$T_c = 0.00032(L^{0.77}/S^{0.385}) \quad (1)$$

Türkiye'de günlük en çok yağış değerleri, 24 saatlik yağışı temsil edemediğinden dolayı, yağış yükseklikleri Maksimize Faktörü denen katsayı ile çarpılır. Tablo 1 ve 2'deki değerler 1.13 maksimize faktörü ile çarpılmamış hâldedir. Bu katsayı ile yağış yüksekliklerinin çarpılması suretiyle maksimum yağış yükseklikleri bulunmuştur. Tablo 3'te verilen alan dağılım oranı ve zaman dağılım oranıyla çarpılarak akış yükseklikleri ve daha sonra ise artım akış yükseklikleri hesaplanmıştır. Havza için pik sağanak süresi hesaplanmış, ayrıca Türkiye'de kritik yağışlar haritasında Çoruhözü havzası için kritik yağış değeri 12 saat olarak okunmuştur (Özdemir, 1978). Havza özellikleri de dikkate alınarak 6, 8 ve 12 saatlik sağanaklar ikişer saatlik dilimlere ayrılmıştır. DSİ Sentetik ve Mockus yöntemleri için iki saatlik birim hidrograflar (BH₂) elde edilmiştir (Şekil 2).

Tablo 3. Sentetik hidrograf hesaplamasında kullanılan havza ve dere verileri.

A	692 km ²												
L	62450 m												
L _c	27500 m												
S	0.0082												
K	0.208												
T _c	10 saat												
	6 saatlik sağanak			8 saatlik sağanak				12 saatlik sağanak					
Alan Dağılım Oranı	0.8385			0.8462				0.8577					
Zamanın Toplam Zaman Oranı	2/6	4/6	6/6	2/8	4/8	6/8	8/8	2/12	4/12	6/12	8/12	10/12	12/12
Zaman Dağılım Oranı	0.71	0.91	1.00	0.63	0.82	0.92	1.00	0.54	0.71	0.83	0.90	0.96	1.00



Şekil 2. DSİ Sentetik ve Mockus yöntemleriyle belirlenmiş birim hidrograflar (BH₂)

Şekil 2’de verilen sentetik birim hidrograflar kullanılarak belirlenen çeşitli tekerrür süreleri için taşkın debilerinin tahmini yapılmıştır (Tablo 4 ve 5). Q_{500} ve Q_{1000} taşkın debilerinin hesabında DSİ Sentetik ve Mockus yöntemleriyle elde edilen Q_{10} ve Q_{100} debileri kullanılır.

Tablo 4. DSİ Sentetik yöntemiyle tahmin edilen maksimum taşkın debileri (m^3/s).

Sağanak Süresi (saat)	Taşkın Debisi							
	Q_2	Q_5	Q_{10}	Q_{25}	Q_{50}	Q_{100}	Q_{500}	Q_{1000}
6	20.28	67.62	123.15	229.24	339.49	496.05	752.23	865.22
8	25.04	74.14	129.88	233.91	340.05	453.93	676.56	774.75
12	29.57	76.63	128.06	222.42	319.24	428.84	635.47	726.61

Tablo 5. Mockus yöntemiyle tahmin edilen maksimum taşkın debileri (m^3/s).

Sağanak Süresi (saat)	Taşkın Debisi							
	Q_2	Q_5	Q_{10}	Q_{25}	Q_{50}	Q_{100}	Q_{500}	Q_{1000}
6	28.23	94.43	171.30	317.62	469.32	645.81	971.80	1115.58
8	34.07	99.46	172.84	314.46	459.64	615.88	920.25	1054.49
12	39.08	99.68	168.00	293.66	420.86	564.62	837.09	957.27

Denklemler 2 ile Q_{500} ve Q_{1000} hesabında kullanılan Z_T katsayıları Tablo 6’da verilmiştir.

$$Q_T = Q_{10} + Z_T \times (Q_{100} - Q_{10}) \quad (2)$$

Tablo 6. Q_T ekstrem debiler için Z_T katsayıları.

Q_T	Z_T
Q_{500}	1.687
Q_{1000}	1.990
Q_{1000}	2.980

2.4. HEC-RAS İle Hidrolik Modelleme

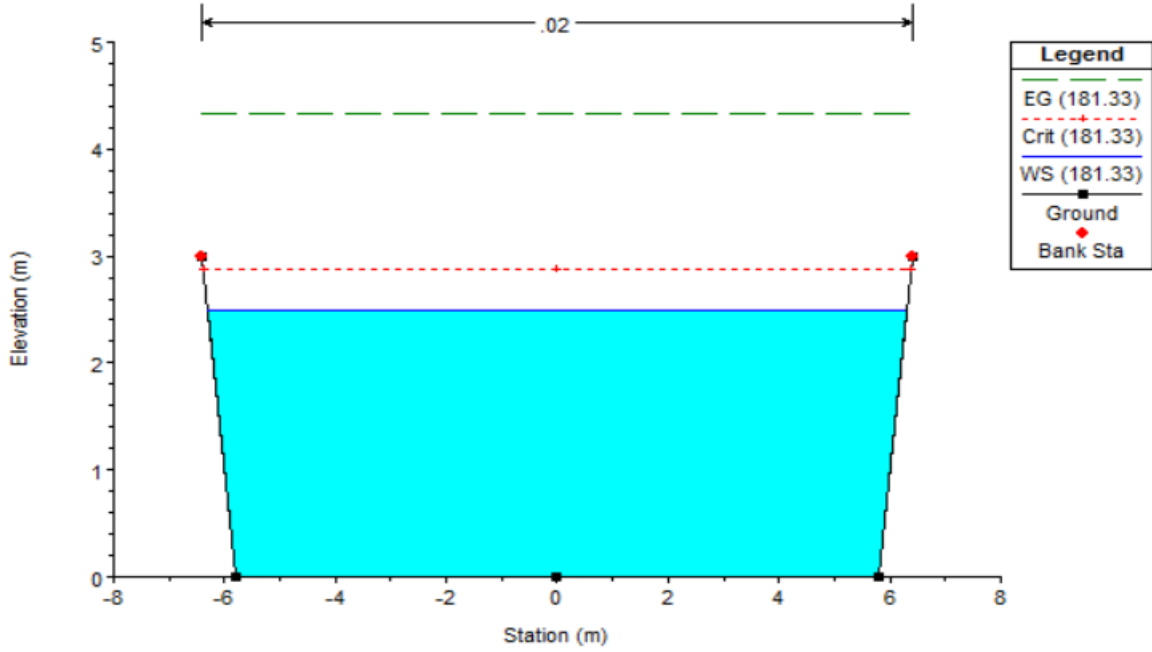
Şekil 3’te uydu görüntüsü, Şekil 4’te fotoğrafı verilen Çoruhözü deresi üzerinde inşa edilmiş beton kaplamalı düzenleme kanalında bitiş kısmına yakın yerdeki 1 ve 2 nolu kesitlerin ölçüleri arazide yapılan ölçümlerle teyit edilmiştir. DSİ raporundan elde edilen



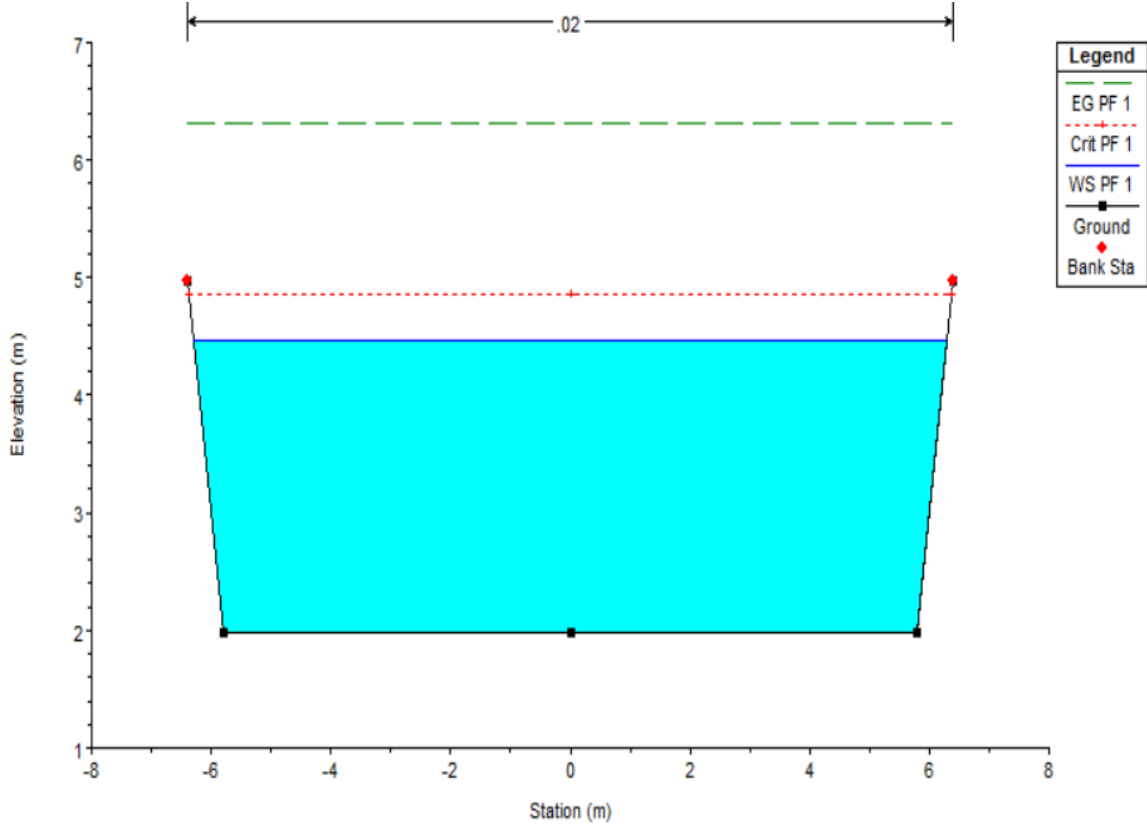
Şekil 3. Düzenleme kanalından alınan kesitlerin uydu görüntüsü.

240.00 m³/s'lik debi ise 3.99 m derinlikte geçmektedir. Bu araştırmada hesaplanan $Q_{500}=635.47$ m³/s debiye sahip olası taşkın kesitten 5.86 m derinlikte geçebileceği görülmüştür. Dere ıslah kesitleri 3 m yüksekliğe sahip olarak tasarlandığı için söz konusu debinin geçebilmesi için kesitlerin yetersiz kaldığı görülmektedir. Yine aynı şekilde bu araştırma kapsamında tahmin edilen $Q_{1000} = 726.61$ m³/s debili olası taşkın güvenle geçebilmesi için kesit yüksekliğinin en az 6.46 m olması gerektiği belirlenmiştir.

3.1. DSİ Proje Debisi $Q_{500}= 181.33$ m³/s İçin Hidrolik Hesap

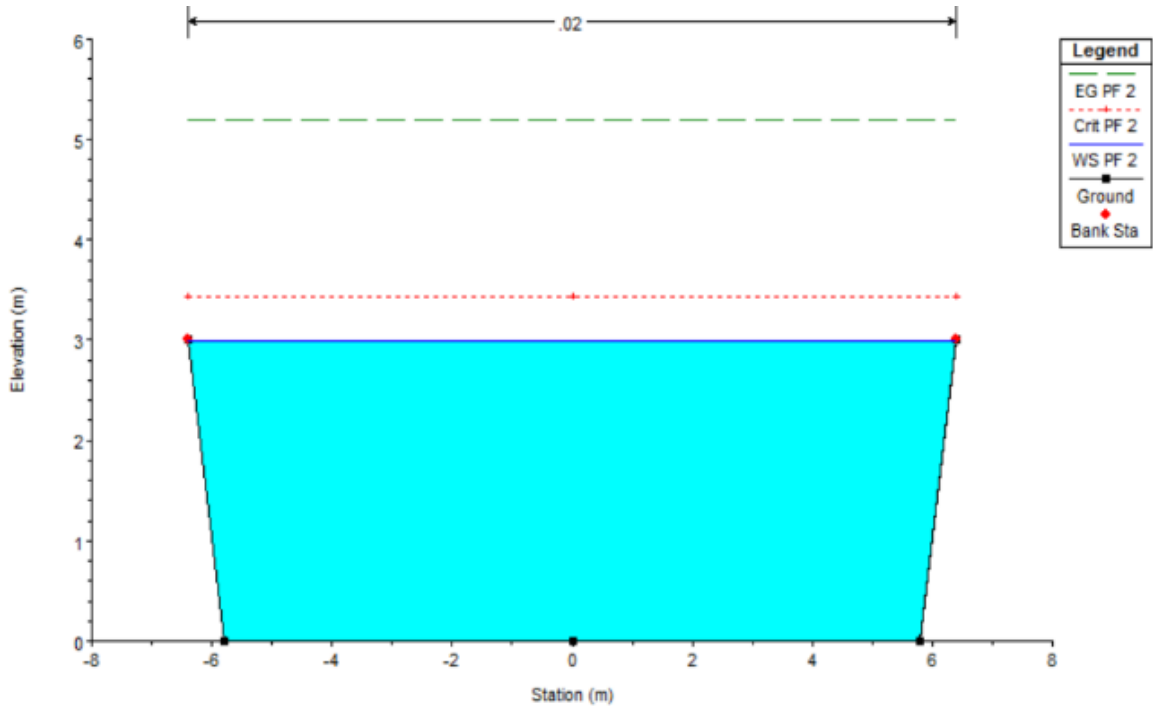


Şekil 6. Çoruhözü deresi düzenleme kanalı 1 no'lu kesit için akım derinliği.

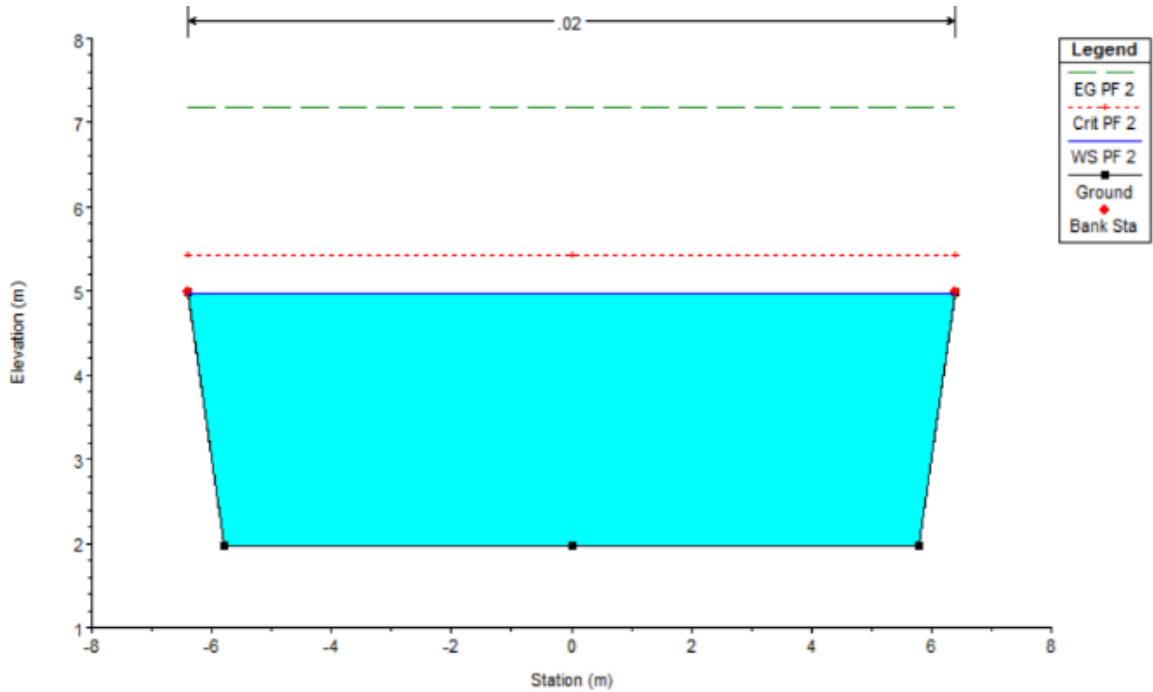


Şekil 7. Çoruhözü deresi düzenleme kanalı 2 no'lu kesit için akım derinliği.

3.2. DSİ Proje Debisi $Q_{1000}= 240.00 \text{ m}^3/\text{s}$ İçin Hidrolik Hesap

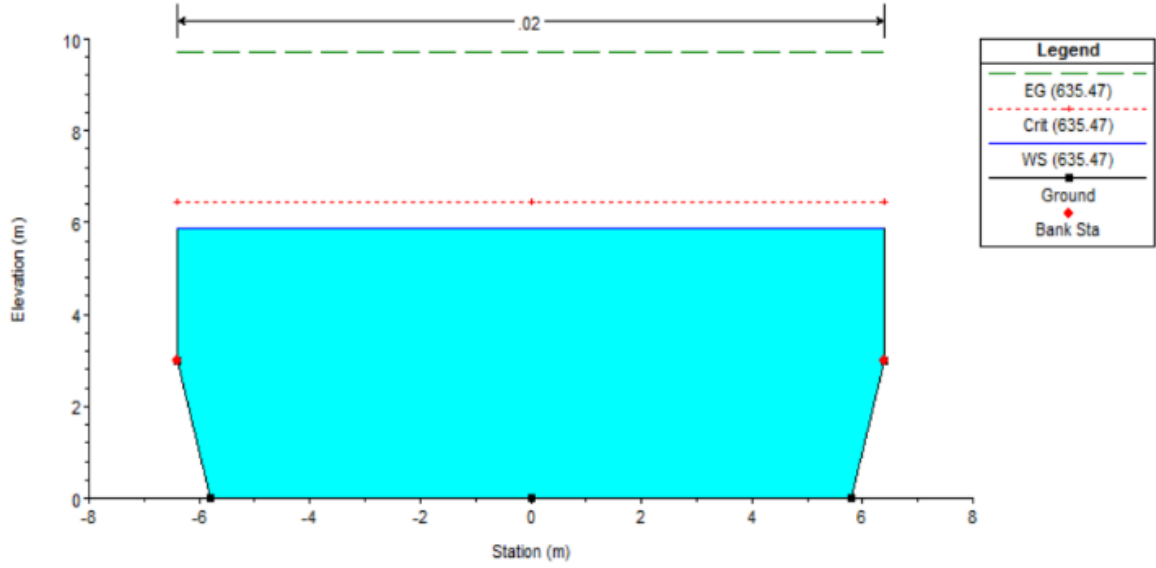


Şekil 8. Çoruhözü deresi düzenleme kanalı 1 no'lu kesit için akım derinliği.

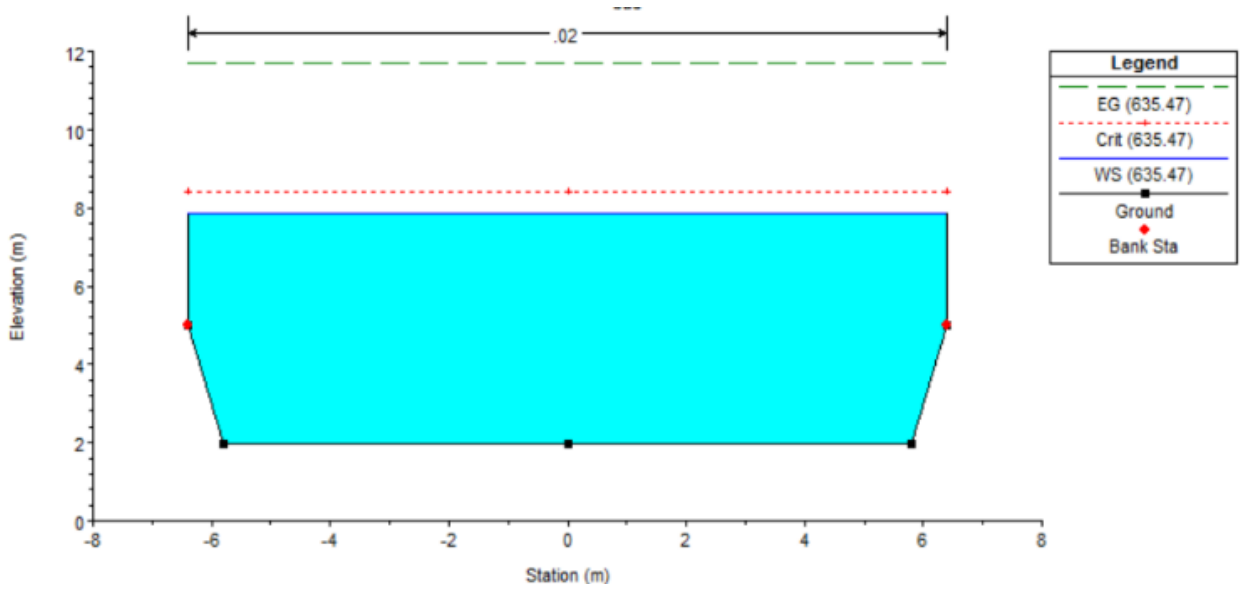


Şekil 9. Çoruhözü deresi düzenleme kanalı 2 no'lu kesit için akım derinliği.

3.3. Güncel Yağış Verileri Kullanılarak Tahmin Edilen $Q_{500} = 635.47 \text{ m}^3/\text{s}$ İçin Hidrolik Hesap

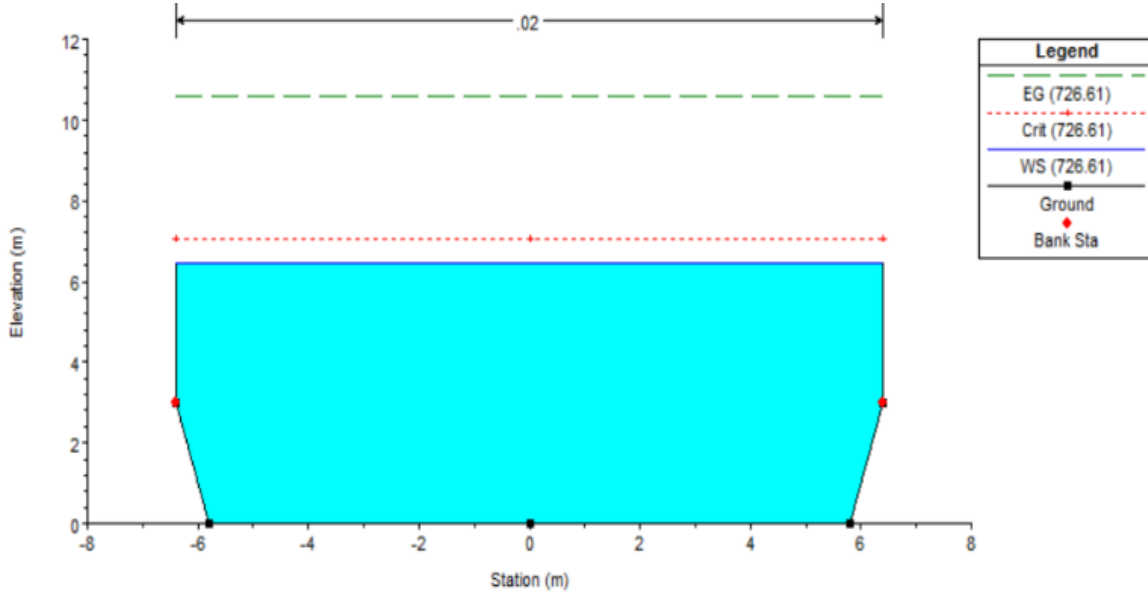


Şekil 10. oruhözü deresi düzenleme kanalı 1 no'lu kesit için akım derinliği.

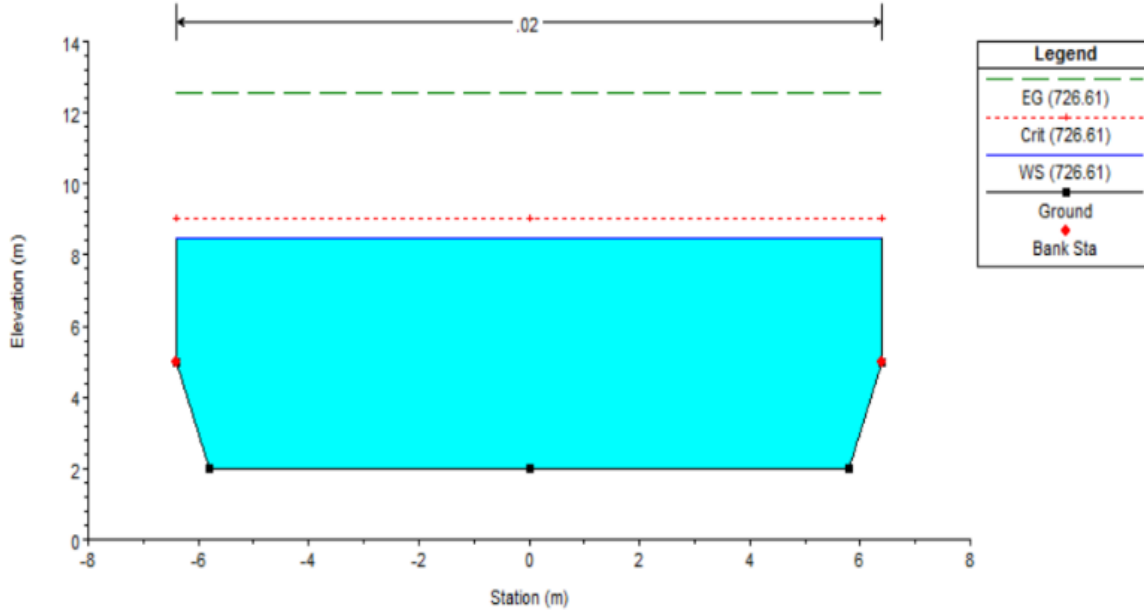


Şekil 11.oruhözü deresi düzenleme kanalı 2 no'lu kesit için akım derinliği.

3.4. Güncel Yağış Verileri Kullanılarak Tahmin Edilen $Q_{1000}= 726.61 \text{ m}^3/\text{s}$ İçin Hidrolik Hesap



Şekil 12. Çoruhözü deresi düzenleme kanalı 1 no'lu kesit için akım derinliği.



Şekil 13. Çoruhözü deresi düzenleme kanalı 2 no'lu kesit için akım derinliği.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, Kırıkkale il sınırları içerisinde bulunan Kızılırmak Nehri'nin yan kollarından birisi olan Çoruhözü deresi üzerinde DSİ tarafından inşa edilen beton kaplamalı kanal kesitlerinin güncel yağış verilerine göre hesaplanan muhtelif tekerrürlü taşkınlarda gösterecekleri performanslar araştırılmıştır. Buna göre, 2015 yılına kadar elde edilen yağış verilerinin kullanıldığı bu çalışmada hesaplanan Q_{500} ve Q_{1000} taşkın debileri için mevcut düzenleme kesitlerinin yeterli olmadığı görülmüştür. HEC-RAS ile yapılan hidrolik modelleme sonuçlarına göre; güncel yağış verileri kullanılarak elde edilen taşkın debilerinin gelmesi halinde Çoruhözü deresinde incelenen kesitlerde akım derinliğinin kanal yüksekliklerinin neredeyse iki katına çıktığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında, eski tarihli yağış verilerine göre tasarlanmış Çoruhözü deresindeki düzenleme kesitlerinin güncel yağış verilerine göre kontrollerinin yapılması gerektiği, olası can ve mal kayıplarının önlenmesi açısından yeni yapılacak tasarımlarda mümkün olan en son tarihli verilerin kullanılmasının gerekli olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmada kullanılan verileri sağlayan Kırıkkale Meteoroloji İstasyonu Müdürlüğüne, DSİ 56. Şube Müdürlüğüne, Kırıkkale Valiliği İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğüne teşekkür eder.

REFERANSLAR

Ackerman, C. T., Jensen, M. R., & Brunner, G. W. (2009). New Floodplain Delineation Capabilities In HEC-RAS. World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers, ASCE, s. 2873-2879, 2009.

- Aksay, C. S., Ketenoğlu, O., & Kurt, L. (2005). Küresel Isınma ve İklim Değişikliği. S. Ü. Fen Ed. Fak. Fen Dergisi, Sayı 25 (2005) 29 -41, Konya.
- Çeliker, M. (2018). Bingöl Kent Merkezindeki Derelerin Taşkın Alanlarının Coğrafı Bilgi Sistemleri (CBS) İle Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Çitgez, T. (2011). Sel ve taşkın zararlarının önlenmesi üzerine bir araştırma: Düzce-Kaynaşlı rneği. Yüksek Lisans Tezi. Düzce Üniversitesi, Düzce.
- Doğu, A. (2016). Kırıkkale Çoruhözü Deresinin Taşkın Debilerinin Hesaplanması ve Bir Boyutlu Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- DSİ (1999). Tuğ, B., zsoy, T., Dinçsoy, Y., & Sönmez, B., Kırıkkale İl Merkezinin Taşkınlardan Korunmasına İlişkin İnceleme Raporu. DSİ, Kod No: 710153, Ankara, 1999.
- DSİ (2012). Taşkınlarda Hidrolojisi Tasarım Rehberi. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. 1. Barajlar Kongresi. Ekim 2012, Ankara, Türkiye.
- Duvan, A. (2016). Kızılırmak Nehri Kırıkkale Bölgesinde Hidrolik Yöntemlerle Taşkın telemesi. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- Efe, H. (2014). Batman Çayı'nın Taşkın Analizinin HEC-RAS Programıyla Yapılması. Yüksek Lisans Tezi. Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
- Eren, M. E., Coşar, A., & Bostan, T. (2015). Silivri Kayalı (Boğluca) Deresi Taşkın Riskinin İrdelenmesi. VIII. Ulusal Hidroloji Kongresi 8-10 Ekim 2015. Harran Üniversitesi, Şanlıurfa.
- Ersoy, S.B. (2017). Manisa Kızıldere Taşkın Akımlarının HEC-RAS ile Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.
- Eryılmaz Türkkan, G., Korkmaz, S. (2015). Kaplıkaya Deresinin Sayısal Model İle Taşkın Analizi. VIII. Ulusal Hidroloji Kongresi 8-10 Ekim 2015, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa.
- Kara, . (2009). Su Yüzü Profillerinin HEC-RAS Paket Programıyla İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Kırıkkale AFAD. Kırıkkale İli Merkez Mahallelerinde 18.07.1999 Tarihinde Meydana Gelen Su Baskımı Durum Raporu. Kırıkkale Valiliği İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü (AFAD), Rapor No: 30820934.5.71.00-155/235.
- Oğraş, B. (2018). Dicle Nehri'nin taşkın analizinin HEC-RAS programıyla yapılması. Yüksek Lisans Tezi. Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
- Onuşuel Gl, G., Gül, A. (2010). İzmir Bostanlı Havzası İçin Taşkın Alanlarının HEC-HMS Ve HEC-RAS Modelleri İle Belirlenmesi. II. Ulusal Taşkın Sempozyumu, Mart 2010, Afyonkarahisar, s. 267-275.
- zdemir, H., Uygulamalı Taşkın Hidrolojisi. DSİ Yayınları, Ankara, 1978.
- Şahin, E., Akıntuğ, B., & Yanmaz, A. M. (2013). Güzelyurt Taşkın Modellemesi Ve Çözüm nerileri. İMO Teknik Dergi, 6447-6462, Yazı 403, 2013.
- Tuncer, İ. (2011). Açık Kanallarda Su Yüzü Profilinin Belirlenmesi, Nakkaş Dere rneğinde Bir HEC-RAS Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources (2010). HEC User Guide, HEC-RAS River Analysis System.
- U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources(2010). Hydraulic Reference Manual 4.1, HEC-RAS River Analysis System.
- Uçar, İ. (2010). Trabzon Değirmendere Havzasında Coğrafı Bilgi Sistemleri Ve Bir Hidrolik Model Yardımıyla Taşkın Analizinin Yapılması. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- nc, Z. (2018). Kırıkkale Karadere ve Hodar Derelerinin Taşkın Pik Debilerinin Hesaplanması ve HEC-RAS Programında Bir Boyutlu Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- nsal, M., Nalcıoğlu, A. (2016). Kılavuzlu Barajı Sulama Kanalında Su Derinliğinin HEC-RAS Programı İle Modellenmesi. KSU. Journal of Engineering Sciences, 19(1): 41-45, 2016.
- ykloğlu, M. (2015). HEC-RAS İle Taşkın Bölgelerinin Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Bozok Üniversitesi, Yozgat.



Ebru Sanatı Temasının Dökme Taş Teknolojisinde Uygulanabilirliğinin Araştırılması

Investigation of the Applicability of Ebru Art in Cast Stone Technology

Murat Gökçe

Amasya Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 05100 Amasya, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 19/05/2019

Kabul/Accepted: 31/05/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Türk sanatları arasında önemli bir yere sahip olan Ebru sanatının görsel teması günümüzde bir çok sektörde kullanılarak geniş bir kullanıcı kitlesine hitap etmekte ve beğenisini kazanmaktadır. Bu çalışmada Ebru sanatının görselliği, yüzey dokusu ve sınırsız renk ahenginin oluşturduğu muazzam temasının, dökme taş yüzeylerinde uygulanabilirliği araştırılmıştır. Dökme taşların üretiminde Ebru sanatının temasının yansıtılması için uygulanan yöntem yüzey boyaması şeklinde olmayıp, üretim sırasında uygulanan ve geliştirilen döküm teknikleri ile gerçekleştirilmiştir. Araştırmada mermer tozu, nano kalsit, çimento, kuvars, polimerler, lif, su ve polikarboksilat esaslı katkı ile toz pigmentler kullanılmıştır. Ebrulu dökme taş üretiminde polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak kendiliğinden yerleşen kıvam da beton kalıplara dökülerek istenilen boyutta örnekler hazırlanmıştır. Yayılma kıvamının akıcı olmasına rağmen kullanılan toz malzemelerinin (>200 mikron altı) miktarı 600 kg/m³ ten fazla olduğundan ayrışma olmaksızın kalıba yerleşebilirlik sağlanmıştır. TS 10449'a göre doğal taş olarak kullanılan hakiki mermerlerin basınç dayanımı 50 MPa ve eğilme dayanımı 6 MPa olmalıdır. Ebrulu dökme taş ürünlerinin basınç dayanımı 64 MPa ve eğilme dayanımı 9,6 MPa olarak bulunmuştur. Bu mekanik sonuçlar neticesinde doğal mermerin kullanıldığı bütün alanlarda Ebrulu dökme taş ürünlerinin rahatlıkla kullanılabilirliği saptanmıştır. Ebru sanatının görsel teması kullanılarak, sehpa ve bahçe masası üretimi gerçekleştirilebilir.

Anahtar Kelimeler

“Ebru sanatı, dökme taş, ev mobilyası”

Abstract

The visual theme of the art of Ebru, which has an important place among the Turkish arts, is appealing to a wide range of users by using it in many sectors. In this study, the visuality of the marbling art, the surface texture and the immense contact created by the unlimited color harmony and the applicability of the cast stone surfaces were investigated. The method used to reflect the theme of marbling art in the production of cast stones was not as a surface painting but was carried out by casting techniques applied during production. Marble powder, nano-calcite, cement, quartz, polymers, fiber, water and polycarboxylate based admixtures and powder pigments were used in the study. Polycarboxylate based plasticizer additive was used in the production of marbling cast stone. Although the flowing consistency is more than 600 kg / m³, the powder materials used (> 200 microns below) have been applied to the mold without decomposition. According to TS 10449, genuine marble used as natural stone should have a compressive strength of 50 MPa and a bending strength of 6 MPa. The compressive strength of Ebru cast stone products was 64 MPa and its flexural strength was 9.6 MPa. As a result of these mechanical results, it has been determined that Ebru cast stone products can be used in all areas where natural marble is used. Kitchen counter, coffee table and garden table can be produced by using the visual theme of marbling art.

Key Words

“Ebru art, cast stone, home furniture”

1. Giriş

İnsanlarda ki görsel algılamayı etkileyen en önemli faktörlerden biride renktir. Estetik amaçlara hizmet eden, mekânın niteliğini belirleyen ve algılama sisteminin bir parçası olan renk, mekâna ayrı bir derinlik ve boyut katmaktadır. Farklı renk türlerinin insanlar üzerinde değişik psikolojik ve görsel etkileri olmaktadır. Çünkü oluşturulan renk düzenleri, kullanıcılar ve de mekânların kullanımı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. İster canlı, ister cansız elemanlar yönünden olsun, renk insanı en çok etkileyen tasarım elemanıdır [Kıran A. (1986)].

Kâğıt süsleme sanatlarımızdan biri olan Ebru, kitre veya benzeri maddeler kullanılarak yoğunluğu arttırılan su üzerine serpilen boyaların şekillenmesi ile oluşturulmuş olup ve bu desenlerin kâğıda aktarıldığı bir sanat dalıdır. [Arıtan A.S., (1999)].

Ebru sözcüğünün aslı Farsç'dan gelmekte olup, renklerin kâğıt üzerinde bulut kümeleri halindeki görünümünden dolayı Farsça bulut-bulutumsu anlamındaki “ebr” adını almıştır. Bu sözcük zamanla değişikliğe uğrayarak “ebri” daha sonra “ebru” halini almıştır [Sungur N, (1994)].

Ebru kelimesinin asıl olarak Ab-ru'dan geldiğini, bunun Farsça'da isim tamlaması karşılığının “yüz suyu”, sıfat tamlaması karşılığının “su yüzü” demek olduğunu, çünkü bu sanatın su yüzünde icra edildiğini savunanlar da vardır [Arıtan, A, S, (2002)].

Ebru sanatı, yaşanan hayatın içindeki her şey gibi değişim ve gelişime ayak uydurmuş, günlük yaşamın içerisinde kendine haklı bir yer edinmiştir. Çağımızın sanat akımları içerisinde yeni bir boyut kazanan Ebru, günümüzde kâğıt dışındaki yüzeylere de uygulanmaktadır. Ebrunun uygulandığı yüzeyler; kitap ve defter kapları olarak, cam üzerinde, duvar kâğıtlarında, ahşap üzerinde, seramik ve çini üzerinde, fular ve eşarplarda, çeşitli kumaşlar üzerinde, deri üzerine, kravatlarda ve perdelerdedir. [Argun , (1984)].

Yeni nesil olarak adlandırılan polikarboksilat esaslı katkılar kıvam kaybını önlemek, işlenebilirliği arttırmak ve betondaki vibrasyon sorununu çözmek için ilk olarak 1980'li yılların sonlarına doğru Japonya'da ortaya çıkmıştır. Polikarboksilat esaslı katkılar kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen beton kendi ağırlığı ile istenilen kesite homojen bir şekilde yayılabilen, vibrasyonsuz kesitte tam doluluğun sağlanabildiği ve yüksek dayanım gibi özellikleri ile de yüksek performanslı bir betondur [Felekoğlu vd. 2003)].

KYB'nin kendi ağırlığı ile döküldüğü kalıba yerleşebilen ve vibrasyon gerektirmeksizin kendiliğinden sıkışabilen özel bir beton türüdür. KYB'nin en önemli avantajı sık donatılı ve dar kesitli yapı elemanlarında, boşluksuz, ayrışma ve terleme gibi problemler yaratmadan homojenliğini ve kohezyonunu koruyabilen, yüksek işlenebilirliğe sahip bir yapı malzemesi olmasıdır [Baradan, & Felekoğlu .(2004)].

KYB'nin sağladığı faydaları özetlemek gerekirse; vibrasyonsuz ve gürültüsüz üretim, servis ömrü uzun beton elemanları, estetik görünümlü beton elemanlarının üretilmesi ve kalıp yüzeyinde ve betonun bünyesinde en az boşluksuz üretim olarak sıralanır.

Ebrulu dökme taş ürünlerinin üretiminde polikarboksilat esaslı kimyasal akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak kendiliğinden yerleşen kıvam oluşturulup, hazırlanan kalıpta ki her türlü doku ve detaylar kolayca elde edilmiştir.

Dökme taş teknolojisinin kullanımı çok eski zamanlara kadar uzanmaktadır. Bazı toplulukların göçtükleri yörelerde toplama taşların bulunmaması yapay taş üretimini zorunlu kılmış ve ilk yapay taş olan kerpiç icat edilmiştir [Akman, (2003)].

Özel olarak tasarlanmış köşe taşları, duvar köşelerinde blok taş görünümü vereceğinden, düz yüzeylerde yakalanan doğallık ve estetik köşelerde de sürdürebilecektir. Kalınlıkları fazla olmadığı için uygulama yapılan mekânlarda gereksiz yer kayıplarıyla karşılaşmaz. Duvarlara yapışan kısmı düz olduğu için tüm uygulamada düzenli ve estetik bir görünüm, fazladan herhangi bir işlem yapmadan sağlanır. [T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, İnşaat Teknolojisi, Duvara Doğal ve Yapay Taş Kaplama, Erişim: <http://megep.meb.gov.tr/>, Ankara, (2012)].

Günümüzde dökme taş teknolojisi ile üretilen yapay taşların doku, dayanıklılık, işlevselik ve renkleri doğal taşlar ile kıyaslandığında ayırt edilemez seviyeye gelmiştir. Yapay taşların sınırsız renk seçeneği ile birlikte arzulanan doku ve şekillerin kalıp yüzeyine yansıtılarak kolayca elde edilmesi ile birçok projede öncelikli tercihlerden birisi olmuştur. Günümüzde tasarımcılar taş ile diğer yapı malzemelerinin ortak kullanımını ile oluşturulan estetik görünüme daha çok yer vermektedirler. Özellikle taş dokularının diğer yapı malzemeleri ile uyumu ve görsel kaliteyi artırmasından dolayı dökme taş teknolojisi ile üretilen yapay taşlara talep hızla artmaktadır.

Doğal olarak çeşitli doku ve renkteki taşları bir arada bulmak oldukça zordur fakat dökme taş teknolojisi le üretilen taşlar ile birçok farklı renk ve dokuyu dökme taş yüzeyinde kolayca elde etmek mümkündür. Doğal taşın sahip olmadığı doku ve renkler dökme taşlarda hayat bulmaktadır. Günümüz teknolojisi ile üretilen dökme taş ürünleri, doğal taş kaplamanın verdiği estetik, doku ve işlevselliği yansıtılabilmekte hatta yüksek dayanım ve mekanik özellikleri ile doğal taşların önüne geçebilmektedir.

Doğal taşların mevcut yoğunluğundan dolayı oluşturduğu ağır yük, dökme taşların hafif birim hacim ağırlıkta üretilebilme seçeneğini ile çözülmüştür. Dökme taşların birim hacim ağırlıkları, hafif agrega veya çeşitli kimyasal katkıları (hava sürükleyici veya köpük yapıcı katkıları) kullanılarak azaltılabilmektedir. Hafif agregaların yapısında bulunan kapalı hücre boşlukları sayesinde ayrıca yalıtım özelliği de kazandırılmıştır. Dökme taşların üretiminde kullanılan çeşitli lif ve polimerlerle güçlendirildiğinde, eğilme ve kırılma mukavemetide artırılmış olup iç ve dış mekânlarda rahatlıkla kullanılabilir.

Ülkemizin ekonomik kalkınma hedeflerinde doğal taş ve dökme taş ürünleri diğer ülkelerle rekabet açısından ciddi bir sektör konumundadır. Doğal taş olarak zengin maden ocaklarına sahip olan ülkemiz, dökme taş teknolojisinin gelişmesi neticesinde bu alanda da rekabet gücü artarak devam etmektedir. Dökme taş teknolojisinin gelişimi ile üretilen taşlar ekonomik, dayanıklı, işlevsel ve estetik olarak istenen şekilde üretilebilmekte ve her geçen gün yeni kullanım alanları bulmaktadır.

Bu çalışma ile dökme taş teknolojisi ile üretilen taşların yüzey dokusuna Ebru sanatının görsel teması yansıtılarak yeni kullanım alanları oluşması sağlanacaktır.

2. Materyal

Bu çalışmada çimento, mermer tozu, nano kalsit, kuvars, sıvı polimer, polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcı katkı, polipropilen lif ve su karışımı kullanılarak Ebrulu dökme taş ürünlerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla çeşitli şekil ve boyutlarda hazırlanan kalıplara Ebrulu dökme taş ürünlerinin dökümü yapılarak şekillendirilmiştir. Çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıda verilmiştir.

2.1 Mermer Tozu ve Özellikleri

0-2 mm tane aralığında ki mermer tozu kullanılmıştır. Mermer tozunun yoğunluğu 2,7 gr/cm³ tür. Mermer tozunun kimyasal özellikleri Tablo 1’ de verilmiştir.

Tablo 1. Mermer tozunun kimyasal özellikleri

KK	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Toplam
43,34	0,01	0,07	0,05	53,94	1,93	0,01	0,06	0,13	99,53

Tablo 1’ de mermer tozunun kimyasal özelliklerine göre % 91 kalsit ve % 9 dolomit bulunduğu tespit edilmiştir.

2.2. Kalsit ve Özellikleri

En büyük tane çapı 5 mikron olan kalsit kullanılmıştır. Kalsitin yoğunluğu 2.72 gr/cm³ ve sertliği mohs skalasına göre 3’ tür.

2.3. Çimento ve Özellikleri

Çalışmada CEM I 52,5 tip beyaz çimento kullanılmıştır. Ebrulu dökme taş ürünlerinde çeşitli renklerin oluşturulması amacıyla beyaz çimento tercih edilmiştir. Beyaz çimentonun yoğunluğu 3,06 gr/cm³ ve yüzey alanı 4600 cm²/gr olarak bulunmuştur. Beyaz çimentonun kimyasal özellikleri aşağıda ki Tablo 2’ de verilmiştir.

Tablo 2. Beyaz çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal özellikler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
(%)	21.16	4.05	0.26	65.7	1.30	0.30	0.35	3.30

2.4. Kuvars ve Özellikleri

Çalışmada 2-4 mm tane çapı aralıklarında olan kuvars agregası kullanılmıştır. Kuvars agregasının fiziksel özellikleri Tablo 3’ de verilmiştir.

Tablo 3. Kuvars agregasının fiziksel özellikleri

Tane Boyu (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Su emme (%)	Sertlik (Mohs)
2-4	2,67	0,1	7

2.5. Kimyasal Katkı ve Özellikleri

Ebrulu dökme taş üretiminde polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Kimyasal katkının fiziksel özellikleri Tablo 4’ de verilmiştir.

Tablo 4. Polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcı kimyasal katkının özellikleri

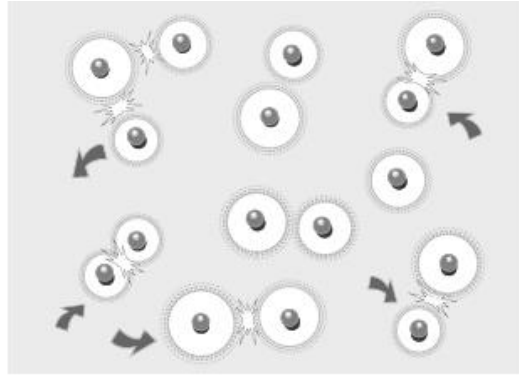
Yoğunluk (kg/l)	pH değeri	Klor içeriği (%)	Alkali içeriği (%)
1,18	7	0,02	1

2.5.1. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların çalışma mekanizması

Akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları, betonun işlenebilmesi ve uygulanabilmesi için gerekli su ihtiyacını azaltıp belirli bir süre kıvamını korumasını sağlarlar. Bu katkıların dağılma mekanizması çimento tanecikleri arasında iki farklı tip itme kuvvetine bağlıdır. Bunlar elektrostatik ve sterik itme etkileridir. Elektrostatik itme karboksil grupların verdiği negatif yükün varlığına, sterik itme etkisi ise uzun kenarlı polimerlere bağlı olarak oluşur.

2.5.2. Dağılma Etkisi-Elektrostatik etki

Katkı molekülleri çimento tanecikleri tarafından çekilerek karıştırma sırasında çimentonun yüzeyine sarılırlar. Çimento partiküllerinin katkı molekülleri tarafından sarılması neticesinde yüzeyindeki negatif yük miktarı artar ve bu da elektrostatik itmeye Şekil 1’de neden olur. Çimento taneciklerinin yüzeyindeki negatif yükten dolayı birbirlerini iterek homojen bir dağılım oluşmasını sağlar. Bunun neticesinde betonun üretiminde kullanılan su miktarı azalmasına rağmen, betonun çalışabilirliğinin önemli ölçüde artışına yol açar [Yılmaz, (2003)].



Şekil 1. Dağılma etkisi-Elektrostatik etki (Dispersion Effect-Electrostatic effect)

2.5.3. Sterik etki

Polikarboksilat esaslı katkı moleküllerinin sahip olduğu uzun kenarlı zincirler neticesinde sterik bir engel oluşur. Katkı moleküllerinin yarattığı bu sterik engel çimento taneciklerinin birbirine olan uzaklığını koruyarak karışım içerisinde çok iyi bir dağılım etkisini Şekil 2’de mümkün kılar [Yılmaz, (2003)].



Şekil 2. Dağılma etkisi-Sterik etki (Dispersion Effect-Steric effect)

2.6. Polipropilen Lif

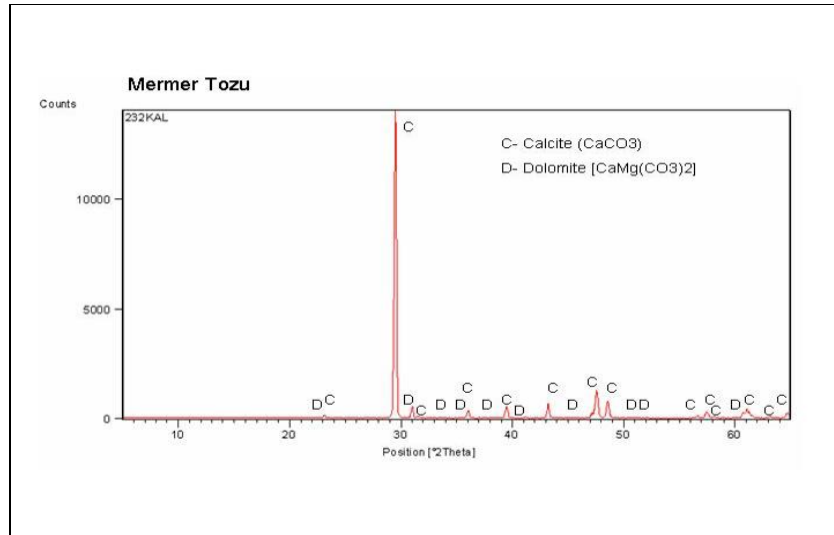
Ebrulu dökme taş ürünlerinin sünekliğini ve eğilme dayanımını artırmak için polipropilen lif kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan polipropilen liflerin boyu 6 mm ve 12 mm, çapı 50 mikrondur. Polipropilen liflere ait mekanik ve fiziksel özellikler Tablo 5’de gösterilmiştir.

Tablo 5. Polipropilen liflere ait fiziksel ve mekanik özellikler

Boyut (mm)	Özgül ağırlık (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Erime Noktası (° C)	Yanma Noktası (° C)	Asit Direnci
6	0,92	630	160	550	Yüksek
12	0,92	630	160	550	Yüksek

3. Metod

Ebrulu dökme taş üretiminde; mermer tozu, nano kalsit, çimento, sıvı polimer, kuvars, polikarboksilat esaslı katkı ve polipropilen lif kullanılmıştır. Ebrulu dökme taş ürünlerin de kullanılan mermer tozunun XRD analizi, taze haldeki bulamaçın yayılma kıvamı, birim hacim ağırlığı, sertleşmiş ürünlerde basınç ve eğilme dayanım sonuçları bulunmuştur. Sertleşmiş ürünlerin yüzeyine cilalama işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3. Mermer tozunun XRD difraktogramı (XRD diffractogram of marble powder)

Şekil 3' de mermer tozunun XRD analizi sonucu görülmektedir. XRD grafiğine göre yüksek miktar da kalsit olduğu saptanmıştır. Ebrulu dökme taş ürünlerin hazırlanması için ilk etapta kullanılan malzemeler bulamaç (çimento, nanokalsit, sıvı polimerler, su ve polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcı karışımı) olarak hazırlanmıştır. Ebrulu dökme taş ürünlerinin üretimi için hazırlanan bulamaçlar yüksek tork ve devir gücüne sahip, planet tipi bir karıştırıcı içerisinde 90 saniye karıştırılmıştır. Bu tip beton karıştırıcılar ile bulamaçlar çok etkin ve homojen bir şekilde karışım sağlanmıştır. Daha sonra kuvars, mermer tozu ve lifler ilave edilerek toplam 3 dakika karıştırılmıştır. Kendiliğinden yerleşen kıvam elde edildikten sonra renkli toz pigmentler ilave edilerek Ebrulu dökme taş ürünlerinin renklendirilmesi yapılmıştır. Ebru sanatının görsel temasını dökme taşların yüzeyine uygulamak için Ebru sanatında olduğu gibi el döküm teknikleri geliştirilerek uygulanmıştır. Bu teknik sayesinde ürünlerin yüzeyin de renklerin ahenkle uyumu ve her kullanıcının göz zevkine ve algılamasına hitap edecek görselliklerin oluşturulması sağlanmıştır.

Taze haldeki bulamaçlar ahşap veya polyesterden üretilen kalıplara dökülerek sertleşmesi için beklenmiştir. Sertleşen ürünlerin yüzeyine su iticilik özelliği kazandırılması için cilalama işlemi yapılmıştır. Epoksi esaslı cila kullanılarak yapılan cilalama işlemi neticesinde yüzeyde hiçbir iz bırakmadan su iticilik kazandırılmış olup ürünlerin su emme özelliği tamamen ortadan kaldırılmıştır.

Hazırlanan Ebrulu dökme taş ürünlerinin taze halde kıvamı (yayılma), birim hacim ağırlığı, sertleşmiş Ebrulu dökme taş ürünlerinin 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı sonuçları bulunmuştur.

Tablo 6. Ebrulu dökme taş karışım oranları

Malzemeler	(kg/m ³)
Çimento	450
Kuvars	900
Mermer Tozu (0-2 mm)	650
Kalsit	160
Polimer	25
Polipropilen Lif (6 mm)	4
Polipropilen Lif (12 mm)	3
Akışkanlaştırıcı	5
Toz Pigment	1
Su	168

Tablo 6’ da Ebrulu dökme taş üretiminde kullanılan malzemelerin karışım oranları verilmiştir. Polikarboksilat esaslı katkıları kullanılarak yapılan Ebrulu dökme taş ürünlerinin üretiminde kullanılan malzemeler için karışım oranları, ayrışma oluşmaması için ince malzeme (100 mikron elek altında kalan malzeme) miktarı toplamı en az 650 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Taze halde kendiliğinden yerleşen kıvamda dökülerek, hazırlanan kalıpta ki bütün yüzey detayların alınması mümkün olmuştur.

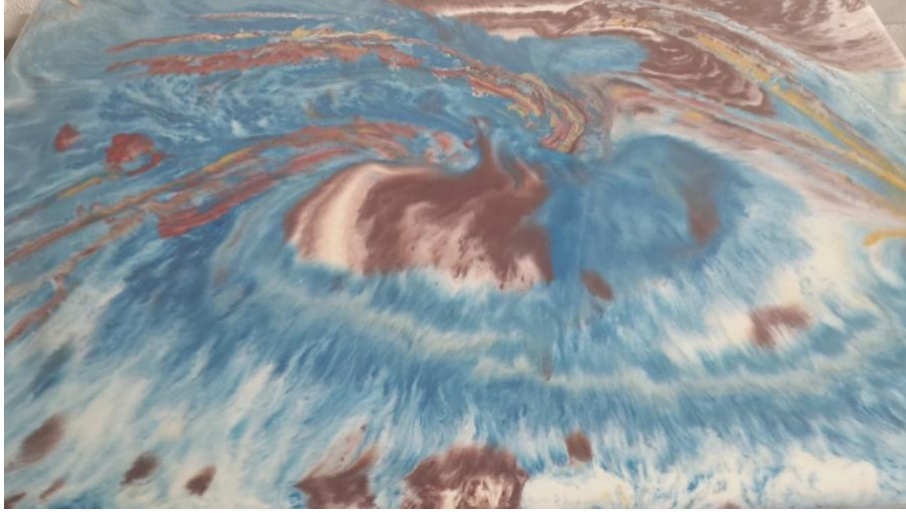
Tablo 7. Taze ve sertleşmiş Ebrulu dökme taş ürünlerinin özellikleri

Taze haldeki Özellikler		Sertleşmiş Ebrulu dökme taş’ nin Özellikleri		
Kıvam Yayılma	Birim hacim ağırlık	Basınç dayanımı	Eğilme Dayanımı	Su emme
(cm)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)	(%)
66	2345	64	9,6	0

Ebrulu dökme taş ürünlerinin eğilme dayanım tayini TS EN 12390-05’e göre ve basınç dayanımı tayini TS EN 12390-4’ e göre yapılmıştır. Tablo7’de eğilme ve basınç dayanım sonuçları verilmiştir. TS 10449’a göre doğal taş olarak kullanılan hakiki mermerlerin basınç dayanımı 50 MPa ve eğilme dayanımı 6 MPa olmalıdır. Ebrulu dökme taş ürünlerinin basınç dayanımı 64 MPa ve eğilme dayanımı 9,6 MPa olarak bulunmuştur. Ebrulu dökme taş ürününün basınç ve eğilme dayanımları doğal taş mermerden daha yüksek olduğu ve mermerlerin kullanıldığı alanlarda kullanılabileceği tespit edilmiştir.

**Şekil 4.** Sehpa tasarımında kullanılan Ebrulu dökme taş örneği

Şekil 4’ de bordo, siyah ve kırmızı pigmentler kullanılarak renklerin ahenkle buluşmasının sağlandığı ev mobilyası olarak kullanılan sehpa üstü dökme taşı görülmektedir. Sehpanın ayakları ahşaptan yapılmış olup, ahşap ve dökme taşın bütünleşmesi sağlanmıştır. Sehpanın boyutları 50x70 cm ve kalınlığı 16 mm’ dir. Yüzeyine uygulanan cilalama neticesinde Ebrulu dökme taş ürünlerinin yüzeyinde leke ve kir tutması önlenmiş ve gerektiğinde yüzey temizliğinin kolay olmasını mümkün kılmıştır.



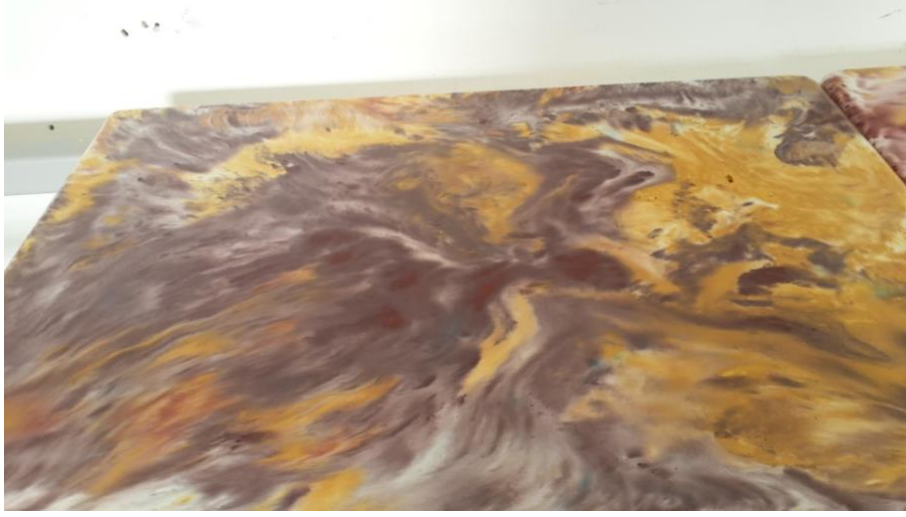
Şekil 5. Farklı renk tonlarında üretilmiş Ebrulu dökme taş örneği

Şekil 5’ te Ebrulu dökme taş ile üretilen yapay taşların doku ve renklerinin doğal taşlardan ayırt edilemez seviyeye geldiği görülmektedir. Doğal taşlarda bulunması zor olan renk ve dokular, dökme taşlarda sağlanarak kullanıcıya sınırsız renk seçeneği sunmaktadır. Ayrıca polimer ve liflerle güçlendirilerek doğal taşlarda yaşanan kırılma ve çatlama sorunlarının da önüne geçilmiştir.

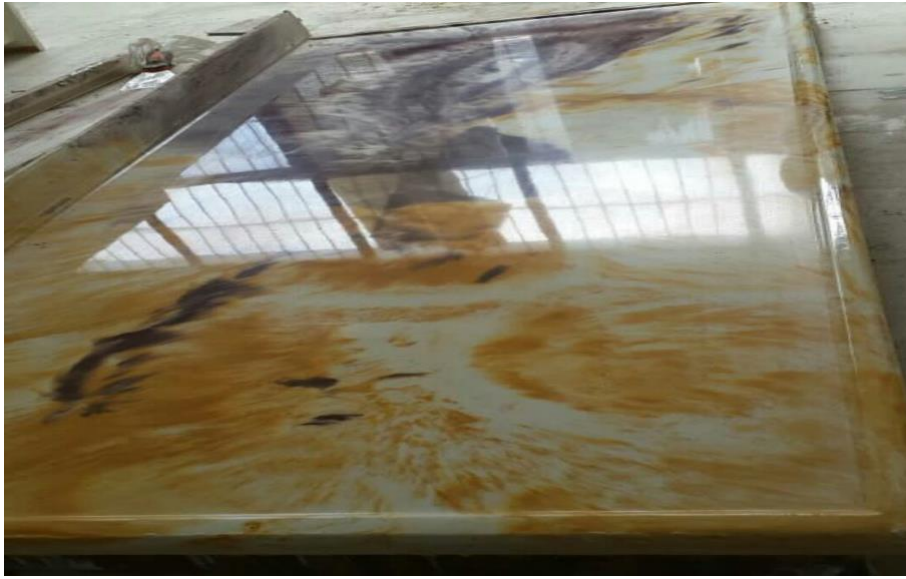


Şekil 6. Sarı ve bordo pigmentlerle üretilmiş Ebrulu dökme taş örneği

Şekil 6’ da sarı ve bordo Şekil 7’ de ise sarı ve kahverengi pigmentlerle renklendirilmiş Ebrulu dökme taş örnekleri görülmektedir. Bu ürünlerin yüksek çekme ve eğilme dayanımı neticesinde yer ve duvar döşemesi olarak da kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Beyaz tonlar için beyaz çimentonun kendi renk tonundan yararlanılmıştır. Kuvars agregalarının kullanımı ile aşınmaya karşı direncide artırılmıştır.



Şekil 7. Sarı ve kahverengi pigmentlerle üretilmiş Ebrulu dökme taş örneği



Şekil 8. Ebrulu dökme taş ile üretilen mutfak tezgahı

Şekil 8’ de Ebrulu dökme taş ile üretilen mutfak tezgâhı örneği görülmektedir. Tek parça halinde üretilen mutfak tezgahı 150 cm boyunda ve 65 cm enindedir. Doğal taş kullanılarak tek parça mutfak tezgâhı üretimi zor iken, yapay taşlarla hiçbir yapıştırma veya ekleme olmadan tek parça olarak üretimi mümkün kılmaktadır. Ebrulu dökme taş mutfak tezgâhının kalınlığı 3 cm olup, hiç çelik donatı kullanılmadan, polimer ve liflerle güçlendirilerek çekme ve eğilme dayanımı artırılmıştır.



Şekil 9. Ebrulu dökme taş masa örneği

Şekil 9’ da Ebrulu dökme taş ürününün masa olarak kullanımı görülmektedir. Masa olarak kullanılacak olan Ebrulu dökme taş ürünlerinin köşe detayları 45 derece açı olacak şekilde kalıpta pah bırakılarak yapılarak ikinci bir işleme gerek duyulmadan tek parça olarak elde edilmiştir.

4. Araştırma Bulguları ve Tartışma

Doğal taşlarda her zaman istenilen renk ve dokuyu bulmak zordur. Doğal taşlara estetik olarak istenen şekil ve ölçüleri vermek makine, teçhizat, işçilik ve zaman gerektirmektedir. Teknolojinin gelişmesi ve artan üretim teknikleri ile dökme taşlar ekonomik olduğu kadar görsel olarak istenen doku ve şekilde kolayca üretmek mümkündür.

Ebru sanatı günümüzde birçok alanda kullanılarak yaşantımızda ki haklı yerini almıştır. İnsanlarda ki farklı renk, işlevsellik, doku ve görsel tema arayışı, sektördeki üreticileri de yönlendirmekte ve sürekli olarak yeniliklere teşvik etmektedir. Yüzey dokusunu ve görsel kaliteyi artırarak müşterisinin beğenisine sunmak isteyen üreticiler, Ebru sanatının muazzam görselliğinden yararlanmaktadırlar. Bu amaçla geliştirilecek olan yeni nesil ev mobilyalarının özgün tasarımları ve renkli görsel dokuları ile kullanıcılar tarafından daha çok arzulanmasını sağlayacaktır.

Bu çalışmamızda Ebru sanatının görsel teması dökme taşların yüzey dokusuna yansıtılarak yeni bir kullanım alanı oluşturulmuştur. Ebrulu dökme taş ürünleri ile sehpa üstü, yemek masası, mutfak tezgâhı, yer ve duvar kaplamaları gibi bir çok alanda kullanılarak, uygulandığı yerlerde görsel kaliteyi yükseltecektir. Ayrıca Ebrulu dökme taş ürünlerinin yüksek mekanik dayanımı hizmet ömrünü artıracaktır.

5. Sonuç

Yeni nesil Ebrulu dökme taş ürünlerinin özgün, estetik ve yaratıcı kimliği buldukları mekânlarda kullanım ve görsel kaliteyi arttıracaktır. Ebrulu dökme taş ürünleri işlevsel, estetik, renk, doku ve algılanabilirlik ölçütleri ile kullanıcıya sınırsız seçenekler sunacaktır.

Görsel algılama ilkeleri doğrultusunda tasarlanacak Ebrulu dökme taş ürünleri işlevsel oldukları kadar birer sanat eseri değerine sahip olacaktır. Ebrulu dökme taş ürünleri ülkemizin kültürel sanatlarından biri olan Ebru sanatını dökme taşların yüzey dokusunda yaşatarak yeni bir kimlik kazandırmış olacaktır.

Ebrulu dökme taş ürünlerinin basınç dayanımı 64 MPa ve eğilme dayanımı 9,6 MPa bulunmuştur. Ebrulu dökme taş ürünlerinin mekanik dayanımları doğal taş hakiki mermerden istenen değerleri sağladığından, doğal taşların kullanıldıkları yerlerde rahatlıkla kullanılacaktır.

Bu çalışmada Ebru sanatın görsel teması kullanılarak mutfak tezgahı, sehpa ve kafe masası üretimi gerçekleştirilmiştir. Ebru sanatı görsel teması ile mutfak tezgâhları, sehpalar, yemek masaları, lavabolar, yer döşemesi ve duvar kaplamaları gibi bütün iç ve dış mekânlar da kullanılabilir estetik ve dekoratif dökme taş üretimi gerçekleştirilebilecektir.

Geliştirdiğimiz Ebrulu dökme taş ürünleri ile dökme taş sektörünün gelişimine katkı sağlanacak ve doğal kaynakların daha az tüketilmesini sağlayacaktır.

Referanslar

- Akman M.S., Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi, TMH - *Türkiye Mühendislik Haberleri*, s 426, (2003).
- Argun İ., “Ebrû Sanatı,” *İstanbul İktisat Dergisi*, s. 224-225, ss 42-43, (1984).
- Arıtan A.S., “Türk Ebru Sanatı ve Bugünkü Durumu,” *Selçuk. Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, s.8, ss.441, (1999).
- Arıtan, A, S, “Türk Ebru Sanatı. Türkler,” *Yeni Türkiye Yayınları*, Konya, Türkiye, s.12. (2002)
- Baradan, B., Felekoğlu, B. “Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özellikleri”. *Beton Kongresi*, İzmir, 234-243.(2004).
- Felekoğlu B., Yardımcı M.Y.,Baradan B., ‘Kendiliğinden Yerleşen Betonların Aşınma ve Donma-Çözülme Direnci,’ 5. **Ulusal Beton Kongresinde** sunuldu, İstanbul, (2003)
- Kıran A., “Rengin Psikolojik Etkilerinin İncelenmesi ve Deneysel Psikoloji Yöntemi ile Ülkemiz için 18-25 Yaş Üzerinde Renk Tercihlerinin Saptanması,” *Doktora tezi*, Y.T.Ü, Ankara, Türkiye, (1986).
- Sungur N., “SanatveKimyaBirArada: Ebru,” *BilimveTeknikDergisi*, s.316, (1994).
- T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, İnşaat Teknolojisi, Duvara Doğal ve Yapay Taş Kaplama, Erişim: <http://megep.meb.gov.tr/>, Ankara, (2012).
- TS 10449, “Mermer-Kalsiyum karbonat esaslı-Yapı ve kaplama taşı olarak kullanılan”, TürkStandartlarEnstitüsü,(2009).
- TS 12390-4, “Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 4 : Basınç dayanımı - Deney makinalarının özellikleri”, Türk Standartlar Enstitüsü,(2002).
- TS 12390-5, “Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5 : Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini”, TürkStandartlarEnstitüsü,(2002).
- TS EN 12350-8, “Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 8: Kendiliğinden yerleşen beton - Çökme yayılma deneyi”, Türk Standartlar Enstitüsü,(2011).
- Yılmaz, A.D., “Yeni kuşak hiper akışkankanlaştırmacı beton katkıları” TMH - *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 426, (2003).