

**Fırat Üniversitesi**  
**Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)**  
**Cilt:30, Sayı:2, Yıl: 2018**  
**ISSN: 1308 - 9072**

### **İletişim**

Fırat Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
23119, ELAZIĞ

**Tel:** 0 424 212 27 07  
**Faks:** 0 424 236 99 55  
**e-posta:** [fenbilimdergi@firat.edu.tr](mailto:fenbilimdergi@firat.edu.tr)

**Baskı:** Fırat Üniversitesi Matbaası

**Bu dergi yılda 2 kez ve hakemli olarak yayımlanır.**

*Derginin Eski adı: Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*  
*Derginin Eski ISSN numarası: 1300-2708*

<http://web.firat.edu.tr/fenbilimleri/Dergiler/MBD/index.html>



**Fırat Üniversitesi**  
**Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)**

**Sahibi**

**Prof Dr. Kutbeddin DEMİRDAĞ**  
Fırat Üniversitesi Rektörü

**Genel Yayın Yönetmeni**

**Prof. Dr. Soner ÖZGEN**  
F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Editör**

**Doç. Dr. Erkan TANYILDIZI**  
Fırat Üniversitesi Enstitüsü Müdür Yrd.

**Editör**

**Dr. Öğr. Üyesi Sencer ÜNAL**  
Fırat Üniversitesi Enstitüsü Müdür Yrd.

**Yayın Kurulu/Editorial Board**

Prof. Dr. Soner ÖZGEN  
Doç. Dr. Erkan TANYILDIZI  
Dr. Öğr. Üyesi Sencer ÜNAL

**DANIŞMA KURULU**

<b>Deniz ÜNER</b>	O.D.T.Ü. Kimya Müh.	<b>Cemal GÖNCÜOĞLU</b>	O.D.T.Ü. Jeoloji Müh.
<b>Nurhan ARSLAN</b>	F.Ü. Kimya Müh.	<b>Erkan TANYILDIZI</b>	F.Ü. Yazılım Müh.
<b>M. Polat SAKA</b>	O.D.T.Ü. Müh. Bil.	<b>Serdar SALMAN</b>	Marmara Ü. Metal
<b>Erhan AKIN</b>	F.Ü. Bil. Müh.	<b>Yusuf CELAYİR</b>	F.Ü. İnşaat Müh.
<b>Z. Hakan AKPOLAT</b>	F.S.M.Ü.	<b>Eres SÖYLEMEZ</b>	O.D.T.Ü. Makine Müh.
<b>Ruşen GEÇİT</b>	O.D.T.Ü. Müh. Bil.	<b>Ülkü YETİŞ</b>	O.D.T.Ü. Çevre Müh.
<b>Umran S. İNAN</b>	Stanford Ü. Elekt-Elktr. Müh.	<b>İlker B. TOPÇU</b>	Osmangazi İnş. Müh.
<b>Cumali KINACI</b>	İ.T.Ü. Çevre Müh.	<b>Bünyamin AKSAKAL</b>	Y.T.Ü. Malz. ve Met. Müh.
<b>Erkan ŞAHİNKAYA</b>	İ.M.Ü. Biyomühendislik	<b>Temel SAVAŞKAN</b>	K.T.Ü. Makine Müh.
<b>Ayşe DALOĞLU</b>	K.T.Ü. İnşaat Müh.	<b>Mehmet CEBECİ</b>	F.Ü. Elekt-Elktr. Müh.
<b>Yetkin TATAR</b>	F.Ü. Bil. Müh.	<b>Sencer ÜNAL</b>	F.Ü. Elekt-Elktr. Müh.



**Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)**  
**30-2, 2018**

**İÇİNDEKİLER / CONTENTS**

<b>1. Kenetlenme Boyu ve Donatı Çapının Beton-Donatı Aderansına Etkisinin Mafsallı Kiriş Deneyiyle İncelenmesi</b> <i>Investigation of Development Length and Rebar Diameter Effects on Bond Strength by Using Hinged Beam Test</i> <b>Mehmet Emin ARSLAN, Talha ARSLAN.....</b>	<b>1-11</b>
<b>2. Kaotik Fonksiyonlar İle EKG Sinyalleri Kullanarak Kişisel Bilgi Şifrelemenin Matematiksel Kriptoanalizi</b> <i>Mathematical Cryptanalysis of Personalized Information Encryption Using ECG Signals with Chaotic Functions</i> <b>M.Tuncay GENÇOĞLU.....</b>	<b>13-17</b>
<b>3. 4,4'-Diaminobifenil'in Yumuşak Çeliğin Hidroklorik Asitteki Korozyonuna Karşı İnhibisyon Etkisi Ve Kuantum Hesaplamaları</b> <i>The Inhibition Effect Of 4,4'-Diaminobiphenyl Against The Corrosion Of Mild Steel In Hcl And The Quantum Calculations</i> <b>Reşit YILDIZI, İlyas DEHRİ.....</b>	<b>19-25</b>
<b>4. Üleksitin H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Çözeltisinde Çözünmesi Üzerine Ultrasesin Etkisi</b> <i>Effect of Ultrasound on The Dissolution of Ulexite in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Solution</i> <b>Melike SINIRKAYA.....</b>	<b>27-32</b>
<b>5. Cu/NiCoBi Elektrotun Hidrojen Gazı Eldesinde Katot Olarak Kullanımı ve Katalitik Etkisinin Zamanla Değişiminin Belirlenmesi</b> <i>The Application of Cu/NiCoBi Electrode as a Cathode for Hydrogen Production and Determination of Catalytic Effect During Long Term Period</i> <b>Mehmet Erman MERT, Başak Doğru MERT.....</b>	<b>33-38</b>
<b>6. Geleneksel Kastamonu Evlerinin İnşasında Kullanılan El İle Üretilmiş Harman Tuğla İle Fabrikasyon Olarak Üretilen Tuğlanın Fiziksel, Mekanik Ve Yapısal Karakterizasyon Özelliklerinin Karşılaştırılması</b> <i>Comparison Of The Physical And Mechanical Properties Of Manually Manufactured And Factory Production Blended Bricks Used In Build Of Traditional Kastamonu Houses</i> <b>Hakan ÇAĞLAR, Arzu ÇAĞLAR, Serra Zerrin KORKMAZ, Bahar DEMİREL, Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR .....</b>	<b>39-48</b>
<b>7. Hatunköy (Hazar Gölü'nün Doğusu, Elazığ) Civarındaki Denizel Sedimanter ve Volkanosedimanter Kayaçların Jeokimyasal Özellikleri</b> <i>Geochemical Characteristics of Marine Sedimentary and Volcano-Sedimentary Rocks Around Hatunköy (East of Hazar Lake, Elazığ)</i> <b>Dicle BAL AKKOCA, Burhan DAŞ .....</b>	<b>49-61</b>
<b>8. Kırık Rotor Çubuğu Arızası için Bulanık Otomata Yöntemi Kullanılarak Gerçek Zamanlı Arıza</b> <i>Real Time Fault Detection Using Fuzzy Automata Method for Broken Rotor Bar Faults</i> <b>Orhan YAMAN, Ebru KARAKÖSE, İlhan AYDIN, Mehmet KARAKÖSE, Erhan AKIN ...</b>	<b>63-72</b>
<b>9. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Konik Geçme Bağlantıların Burulma Momenti Etkisindeki Davranışları</b> <i>Behaviour of Conical Adhesive Joints Under the Action of Torsional Moment</i> <b>Murat Yavuz SOLMAZ, Betül TAŞ .....</b>	<b>73-86</b>
<b>10. Yemişlik Civarında (Elazığ Güneyi) Elazığ Magmatitleri'nin Mineralojisi ve Jeokimyasal Özellikleri</b> <i>Mineralogy and Geochemical Characteristics Of Elazığ Magmatics Around Yemişlik (East of Elazığ)</i> <b>Dicle BAL AKKOCA, Sevcan KÜRÜM, Zülfü BAKIR .....</b>	<b>87-102</b>

<b>11. Tabakalı Kompozitlerin Gerilme Analizi Üzerinde Doğrusal Olmayan Malzeme Davranışının Etkisi</b> <i>Effect of Non-linear Material Behavior on Strees Analysis of Laminated Composites</i> <b>Mete Onur KAMAN</b> .....	<b>103-110</b>
<b>12. AA Kıyıcı Beslemeli Bir Fazlı Asenkron Motor Hız Kontrolü</b> <i>AC Chopper Fed Single Phase Induction Motor Speed Control</i> <b>Zeynep Bala DURANAY, Hanifi GÜLDEMİR</b> .....	<b>111-119</b>
<b>13. Reflüks Yöntemle Sentezlenmiş Mangan Oksit İle Sabit Yataklı Kolon Reaktörde Parasetamol Giderimi</b> <i>Paracetamol Removal in Fixed Bed Column Reactor with Manganese Oxide Synthesized by Reflux Method</i> <b>Özlem Tepe</b> .....	<b>121-126</b>
<b>14. Mekanik Bir Sistemin Bir Ters Rezonans Frekansının Kütle Eklenerek Değiştirilmesi</b> <i>Changing One of the Anti-Resonance Frequencies of A Mechanical System by a Point Mass Modification</i> <b>Orhan ÇAKAR</b> .....	<b>127-134</b>
<b>15. Nitratın Çeşitli Topraklardaki Adsorpsiyon Hızlarının İncelenmesi</b> <i>Investigation of Nitrate Adsorption Rates in Various Soils</i> <b>Cevdet AKOSMAN, Tuba ÖZDEMİR</b> .....	<b>135-143</b>
<b>16. Geliştirilmiş Adaptif Sinüs Kosinüs Algoritması (ASKA)'nın Optimizasyon Problemlerinin Çözümünde Kullanılması</b> <i>The Use of Improved Adaptive Sine Cosine Algorithm (ASKA) in the Solution of Optimization Problems</i> <b>Erkan TANYILDIZI, Gökhan DEMİR</b> .....	<b>145-154</b>
<b>17. FPGA Donanımı Üzerinde Çalışan Elma Sınıflandırma ve Boyutlandırma Sistemi</b> <i>Apple Classification and Dimensioning System Based that Runs on FPGA Hardware</i> <b>Eser SERT</b> .....	<b>155-164</b>
<b>18. Dolgu Duvarların Modellenme Yaklaşımlarının Betonarme Çerçeve Davranışına Etkisi</b> <i>Effect of Modeling Approaches of Infill Walls on Reinforced Concrete Frame Behavior</i> <b>Sibel SAĞLIYAN</b> .....	<b>165-174</b>
<b>19. 60 GHz mm-Dalgı Bandı için Üç Boyutlu Bina İçi Büyükölçek ÇGÇÇ Kanal Modelleme</b> <i>Three Dimensional Indoor Massive MIMO Channel Modelling for 60 GHz mm-Wave Channel</i> <b>Barış YÜKSEKKAYA</b> .....	<b>175-184</b>
<b>20. Atık Bor İçeren Asfalt Betonlarının Performanslarının Değerlendirilmesi</b> <i>Performance Evaluation Of Asphalt Concrete Containing Boron Wastes</i> <b>Mustafa KESKİN, Murat KARACASU</b> .....	<b>185-192</b>
<b>21. Farklı Duvar ve Yakıt Tiplerinde Optimum Yalıtım Kalınlığının Isıtma ve Soğutmada Tespiti ve Çevresel Etkileri</b>  <i>Detecting The Optimum Insulation Thickness For Different Wall And Fuel Types For Heating And Cooling And The Environmental Effects</i> <b>Hakan KARAKAYA</b> .....	<b>193-202</b>
<b>22. Seralarda Isıtma Miktarının Yumuşak Hesaplama Teknikleri Kullanılarak Belirlenmesi</b> <i>The Determination of Greenhouse Heating Amount by Using Soft Computing Techniques</i> <b>Özlem ALPAY, Ebubekir ERDEM</b> .....	<b>203-213</b>
<b>23. Ti-6Al-4V Alaşımının Fiber Lazer ile Kesilmesinde İşlem Parametrelerinin Kesim Kalitesine Etkisinin Araştırılması</b> <i>Investigation of the Effect on Cutting Quality of Process Parameters in Fiber Laser Cutting of Ti-6Al-4V Alloy</i> <b>Mustafa AY, Fatih YÜCELİŞLİ</b> .....	<b>215-223</b>

<b>24. Faz Değiştiren Malzeme İçeren Silindirik Bir Isıl Enerji Deposunda Kanatçık Sayısı, Kalınlığı ve Üniform Olmayan Kanatçık Dağılımının Isıl Enerji Depolama Karakteristiği Üzerindeki Etkileri</b> <i>Effects of the Number, Thickness and Non-uniform Distribution of Fins on the Heat Storage Characteristics in a Cylindrical Thermal Energy Storage with Phase Change Material</i> <b>ığdem SUSANTEZ, Kamil KAHVECİ, Erhan AKYOL .....</b>	<b>225-237</b>
<b>25. Sıncap Kafesli Asenkron Generatörlü Rüzgar Türbin Sisteminin Özdeğer Hassasiyet ve Salınlımlı Kararlılık Analizi</b> <i>Eigenvalue Sensitivity and Oscillatory Stability Analysis of Wind Turbine System with Squirrel cage induction generator</i> <b>Burak YILDIRIM .....</b>	<b>239-247</b>
<b>26. Siğil Tedavisinde Sınıflandırma Algoritmalarının Performans Analizi</b> <i>Performance Analysis of Classification Algorithms in Wart Treatment</i> <b>Erkan TANYILIDIZI, Murat KARABATAK, Göke YILDIRIM, Zeynep ÖZPOLAT .....</b>	<b>249-256</b>
<b>27. 802.15.4 Tabanlı Sensör Düğümü Tasarımı ve Geliştirilen Kablosuz Sensör Ağ Uygulama Ortamı: FıratZigBee</b> <i>Design of an 802.15.4 Based WSN Node and a Wireless Sensor Network Application Platform: FıratZigBee</i> <b>Güngör YILDIRIM, Yetkin TATAR .....</b>	<b>257-267</b>
<b>28. Nanoyapılı Hegzagonal Bor Nitrür Üretimi ve Karakterizasyonu</b> <i>The Production and Characterization of Nanostructured Hexagonal Boron Nitride</i> <b>Handan AYDIN .....</b>	<b>269-275</b>
<b>29. Merkezi Örüntü Üreteçlerinin Robotlarda Hareket Kontrolü için Çeşitli Uygulamaları: Bir Araştırma</b> <i>Various Applications of Central Pattern Generators for Locomotion Control in Robots: A Review</i> <b>Deniz KORKMAZ, Gonca ÖZMEN KOCA, Cafer BAL .....</b>	<b>277-294</b>
<b>30. Cu-13Al-4Ni Şekil Hatırlama Alaşımında Çekme Gerilmesinin Mikro Yapıya Etkileri</b> <i>Effeect to Microstructure of Tensile Stress in Cu-13Al-4Ni Shape Memory Alloy</i> <b>Ő.Nevin BALO, Mehmet CEYLAN .....</b>	<b>295-301</b>
<b>31. Katalizör Olarak Katılan Bor Oksit ve Borik Asidin Polyester Üzerindeki Etkilerinin Mekanik ve Mikroyapı Açısından İncelenmesi</b> <i>The Investigation of the Effects of Boron Oxide and Boric Acid, Added As Catalyst, on Polyester in terms of Mechanical Properties and Microstructure</i> <b>Yahya TAŞGIN.....</b>	<b>303-311</b>
<b>32. Yaşlandırma Süresinin TiNi Şekil Hafızalı Alaşımında Termodinamik Parametreler ve Yapısal Özellikler Üzerine Etkisinin İncelenmesi</b> <i>Investigation of the Effect of Aging Time on Thermodynamic Parameters and Structural Properties of TiNi SMA</i> <b>Canan Aksu CANBAY, İskender ÖZKUL .....</b>	<b>313-318</b>
<b>33. Ayrık Dalgacık Dönüşümünün FPGA Tabanlı Donanımsal Gerçeklenmesi</b> <i>Hardware Implementation of FPGA-Based Discrete Wavelet Transform</i> <b>Resul ÇÖTELİ, Serkan METİN .....</b>	<b>319-325</b>
<b>34. Eylem Öğrenmenin Okul Yöneticileri ve Yönetici Adaylarının Karar Vermelerine Etkisinin Veri Madenciliği Teknikleri ile İncelenmesi</b> <i>Data Mining Techniques Based Analysis of the Impact of Action Learning on Decision-Making Styles of School Administrators and Administrator Candidates</i> <b>Dönüş ŞENGÜR, Muhammed TURHAN, Songül KARABATAK .....</b>	<b>327-337</b>





## **Kenetlenme Boyu ve Donatı Çapının Beton-Donatı Aderansına Etkisinin Mafsallı Kiriş Deneyiyle İncelenmesi**

**Mehmet Emin ARSLAN, Talha ARSLAN**

Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü  
mehmeteminarслан@duzce.edu.tr

(Geliş/Recieved: 14.03.2017; Kabul/Accepted: 10.09.2018)

### **Özet**

Betonarmenin varlığını borçlu olduğu beton-donatı aderansı konusu, betonarme yapıların kullanılmaya başladığı ilk yıllardan beri bilim insanlarının ilgisini çekmiştir. Bu konuyla alakalı birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Beton-donatı aderansı konusunda birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, aderans olayının karmaşık olması sebebiyle konu tam olarak aydınlatılamamıştır. Bu sebeple, bu çalışmada, farklı donatı çapları (10, 12, 14 mm) ve kenetlenme boyları (100, 150, 200 mm) sabit bir beton sınıfı kullanılarak, beton-donatı aderansı mafsallı kiriş deneyi yardımıyla eğilme altında deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma, toplam 9 adet mafsallı kiriş üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, kenetlenme boyunun ve donatı çapının aderans dayanımını önemli derecede etkilediğini ortaya koymuştur. Aynı kenetlenme boyu için düşük çaplı donatılarda daha yüksek gerilme değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca kenetlenme boyu arttıkça sıyrılmalar azalmış ve aderans dayanımı artmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Beton-Donatı Aderansı; Kenetlenme Boyu; Donatı Çapı; Mafsallı Kiriş Deneyi

## **Investigation of Development Length and Rebar Diameter Effects on Bond Strength by Using Hinged Beam Test**

### **Abstract**

The subject of bond strength, which is due to the presence of reinforced concrete, has attracted the attention of scientists since the first years of the usage of reinforced concrete constructions. There have been many studies carried out on this subject. Although many studies have been made about bond strength, the subject has not been fully clarified yet as the bond strength phenomenon is complicated. Therefore, in this study, the bond strength between reinforcement and concrete has been experimentally observed under bending with the help of hinged beam test by using different reinforcement diameters (10,12,14 mm ) and development lengths (100,150,200 mm) and fixed concrete class. Experiments were carried out on a total of 9 hinged beams. The results of the experiment showed that development length and reinforcement diameter significantly affect the bond strength. It has been specified that maximum tensile stress estimated for the same development length on low reinforcement diameter is higher. Furthermore, while the maximum tensile stress increased for extending development length, slips decreased.

**Keywords:** Bond Strength, Development Length, Rebar, Hinged Beam Test

### **1. Giriş**

Bilindiği gibi, betonarme varlığını betonla donatı arasındaki aderansa borçludur. Aderansın tam olarak sağlanabilmesi uygun bir kenetlenme boyunun mevcut bulunması gerekmektedir. Uygun kenetlenme boyu, donatı akma dayanımına ulaştığında beton ve donatı arasında önemli bir sıyrılmaya oluşturmaz boy olarak ifade edilebilmektedir. Yapı ömrü boyunca aderans önemli bir azalmanın olmaması için ise aderansı olumsuz etkileyen faktörler dikkate alınarak gerekli önlemler alınmalıdır [1-4].

Aderans dağılımını etkileyen parametreleri belirlemek için birçok deney türü geliştirilmiştir. Bu deneylerden en yaygın olarak kullanılanı merkezi çekip çıkarma deneyidir. Bu deney basit olmasına rağmen, kesme kuvvetlerinin bulunmaması, gerilme yığılmalarının oluşması gibi eksiklikleri nedeniyle gerçek davranışı tam olarak yansıtmamaktadır. Bu nedenle birçok deney türü geliştirilmiştir. Dışmerkez çekip-çıkarma deneyi bunlardan bir tanesidir [2,4-8]. Bu düzenek, düşey konumda olması nedeniyle, kirişlerdeki sehimleri temsil etmemesi dışında, donatıya dik kesme kuvvetlerinin bulunması,

eğilmeden dolayı çatlama meydana gelmesi, donatı civarında yerel basınç gerilmelerinin oluşmaması ve pas payının daha gerçekçi olması nedeniyle, diğerler çekip-çıkarma deneylerine göre daha gerçekçidir. Çekip-çıkarma deneylerinin hiçbiri, eğilmeye çalışan bir elemandaki donatı-beton aderansını tam olarak temsil etmediğinden bu deneyler yerine kiriş deneyleri geliştirilmiştir. Bu deneylerden en yaygın olarak kullanılanları Texas Çıkmalı Kiriş, İngiliz Standardı, Hollanda ve Mafsallı Kiriş adıyla bilinen deneylerdir [1-4, 9-15].

Beton-donatı aderansı konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğunda çekip-çıkarma deneyi kullanılmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmada, yöntem olarak literatürde az sayıda çalışma bulunan mafsallı kiriş deneyi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, farklı donatı çapları ve kenetlenme boylarıyla üretilen mafsallı kiriş deney numunelerinin aderans davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma, sabit 300 dozajla üretilen, farklı donatı çapı (10, 12, 14 mm) ve her çap için üç farklı kenetlenme boyunun (100 mm, 150 mm ve 200 mm) kullanıldığı toplam 9 adet mafsallı kiriş numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir.

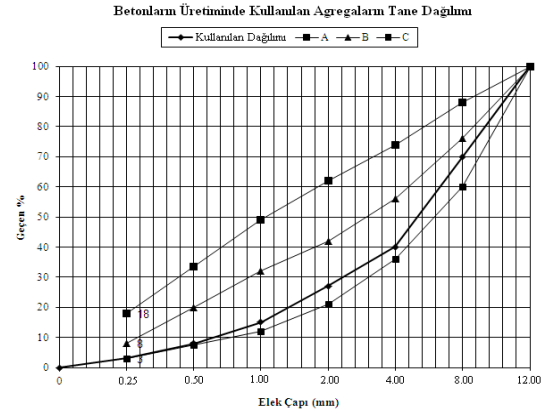
## 2. Deneysel Çalışma

### 2.1. Betonların üretiminde kullanılan malzemeler ve karışım oranları

Betonların üretiminde Bolu Çimento Fabrikası'nda TS – EN 197-1 [16] uygun olarak üretilmiş CEM-I 42,5 R Portland çimento kullanılmıştır. Deney elemanları 300 kg dozlu, sabit 0,60 su/çimento oranına sahip beton kullanılarak üretilmiştir. Betonların üretiminde aynı tane dağılımına sahip, iri ve ince olmak üzere iki farklı agrega kullanılmıştır. Agregaların fiziksel özellikleri ve tane dağılım grafiği sırasıyla Tablo 1 ve Şekil 1'de verilmektedir. Deney elemanlarının üretiminde kullanılan betonların mutlak hacim yöntemine göre belirlenen karışım oranları ise Tablo 2'de verilmektedir.

**Tablo 1.** Beton üretiminde kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Tane Boyutu (mm)	Sıkı Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Gevşek Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Birim Hacim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )		Kütlece Su Emme (%)
			Kuru	Doğgun	
İri>4 mm	1580	1450	2620	2643	0.9
İnce≤4 mm	1630	1470	2580	2610	1.1



**Şekil 1.** Beton üretiminde kullanılan agregaların tane dağılım grafiği.

**Tablo 2.** Beton karışım oranları

Elek Gözenek Açıklıklarına Göre Agrega Miktarları (kg/m <sup>3</sup> )		Doyma Suyu Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	Karma Suyu Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	Çimento Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	Akışkanlaştırıcı (kg/m <sup>3</sup> )
Açıklıklar (mm)	4.0-12.0				
0-4.0	1105	18.42	180	300	3.0

### 2.2. Betonların üretimi, bakımı ve bazı mekanik özellikleri

Beton üretiminde 60 litre kapasiteli eğik eksenli bir betonyer kullanılmıştır. Betonların üretiminde kullanılan agregalar, çimento, akışkanlaştırıcı, doyma ve karma suyu hassas terazide tartılarak hazırlanmıştır. Agregalar nemlendirilmiş betonyere ilave edilmiş ve doyma suyu ilave edilerek üç dakika karıştırılmıştır. Hemen sonra çimento eklenerek üç dakika daha karıştırıldıktan sonra karma suyu ve akışkanlaştırıcı ilave edilmiş ve üç dakika daha karıştırılarak betonlar elde edilmiştir. Betonların bazı mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla boyutları 150 mm olan küp numuneler, önceden yağlanmış kalıplara, üç tabaka halinde sarsma tablasıyla yerleştirilmiştir. Üretimlerinden bir

gün sonra kalıplarından çıkarılan beton numuneler 28 gün süre ile sıcaklığı  $22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  olan kür havuzunda bekletilmiş ve tek eksenli basınç ve yarmada çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Mafsallı kirişlerin üretiminde kullanılacak betonlardan alınan küp numuneler üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli basınç ve yarmada çekme deneylerinden elde edilen basınç ve çekme dayanımları sırasıyla, 34.5MPa ve 6.15 MPa olarak belirlenmiştir.

### 2.3. Kullanılan donatuların bazı mekanik özellikleri ve modüler kalıplar

Betonla olan aderans davranışlarını mafsallı kiriş deneyi ile belirlemek amacıyla 10, 12, 14 mm çaplı üç farklı nervürlü betonarme donatı kullanılmıştır. Kullanılan donatılara ilişkin bazı mekanik özellikler Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Deneylerde kullanılan nervürlü donatıların bazı mekanik özellikleri

Anma Çapı (mm)	Ortalama Akma Dayanımı (MPa)	Ortalama Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Birim Uzaması (%)	Kopma Birim Uzaması (%)
10	509	595	1,19	13
12	442	575	1,28	16
14	487	640	1,33	18

Mafsallı kirişlerin üretiminde 3 mm kalınlığında modüler çelik kalıplar kullanılmıştır. Kenetlenme boylarını sınırlamak amacıyla donatılarda plastik kılıflar kullanılmıştır. Kılıfların içlerine betonun girmesini engellemek için uçları silikonla kapatılmıştır (Şekil 2).

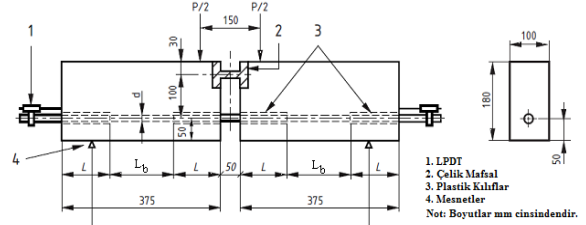


**Şekil 2.** Mafsallı kirişlerin üretiminde kullanılan modüler çelik kalıplar.

### 2.4. Mafsallı kirişlerin üretimi, deney düzeneğinin hazırlanması ve deneyin yapılışı

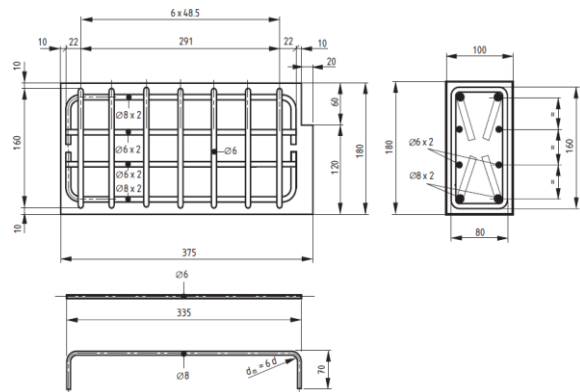
Mafsallı kiriş deney numuneleri, karışım

oranları Tablo 2'ye uygun olarak üretilen beton kullanılarak, BS 4449:2005 [17] standardına uygun hazırlanmıştır. Üretilen kiriş numunelerine ilişkin boyutlar, deneye ait yükleme ve ölçüm düzeneğinin şematik görünümü Şekil 3'te verilmektedir.



**Şekil 3.** Mafsallı Kiriş Deney Numunelerine İlişkin Boyutlar ve Deney Düzeneği.

Kirişe kullanılan donatıların detayları ise Şekil 4'te verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, kirişlerin üretiminde enine, boyuna ve gövde donatıları kullanılmıştır. Bu donatıların kullanımındaki amaç, deney numunelerinde kesme ve eğilme çatlaklarının oluşmasını önlemek ya da çatlakları kılcal düzeyde tutarak ölçümlerin daha doğru bir şekilde yapılması sağlamaktır. Bu deney düzeneği ve donatı detayı, aderans dayanımı belirlenecek olan donatı çapının 16 mm'den küçük olması durumunda geçerlidir. Daha büyük çapta donatının test edilmek istenmesi durumunda numune boyutları ve donatı düzeninin yine BS 4449:2005'e [17] göre belirlenmesi gerekmektedir.



**Şekil 4.** Mafsallı kirişlerin üretiminde kullanılan donatı detayı.

Üretilen betonlar hazırlanan kalıplara iki aşamada dökülmüştür. Sarsma tablası kullanılarak betonun uygun bir şekilde

sıkıştırılması sağlanmıştır. Kalıplardan çıkarılan kiriş numunelerine, ıslak çuvallar kullanılarak laboratuvar ortamında kür uygulanmıştır. Laboratuvar ortamında ıslak çuvallarla kür uygulanan deney numunelerinin bir görünümü Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. Mafsallı kiriş deney numunelerine kür uygulaması.

Deney kirişlerine düşey yük 600 kN kapasiteli hidrolik piston yardımıyla 0.5kN/s hız ile otomatik olarak uygulanmıştır. Mafsallı kirişler biri sabit diğeri ise hareketli iki mesnet üzerine yerleştirilmiş ve kirişin orta noktasından düşey olarak yüklenmiştir. Orta noktadan uygulanan yükler yük hücresi (Loadcell) ile belirlenmiştir. Kiriş numunesinin iki ucunda donatının betondan sıyrılma miktarını ölçmek için 0,013 mm hassasiyetinde potansiyometrik yerdeğiştirme ölçerler (LPDT) kullanılmıştır. Düşey olarak uygulanan yükler ve bunlara karşılık gelen sıyrılma değerleri eş zamanlı olarak veri toplama ünitesi yardımıyla kaydedilmiştir. Mafsallı kiriş deneyinin yapılışı esnasından bir görünüm Şekil 6'da verilmektedir. Kiriş numunesinin orta kısmında, aderans ölçümü yapılan donatıya etkileyen kuvvetin daha kesin bir şekilde tespit edilmesi için çelik mafsal yerleştirilmiş ve donatının beton ile temas ettiği uzunluk olan  $L_b$  kenetlenme boyu, donatının uç kısımlarına plastik kılıflar kullanılarak sınırlandırılmıştır (bkz. Şekil 2 ve Şekil 3).



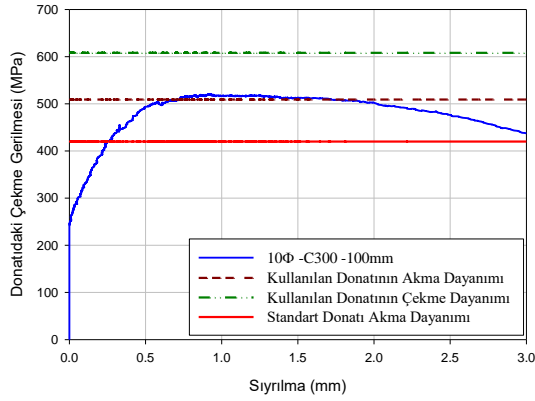
Şekil 6. Mafsallı kiriş deneyinde bir görünüm

### 3. Bulgular

Gerçekleştirilen deneysel çalışma ile sabit 300 kg çimento dozajlı betonlar kullanılarak üretilen mafsallı kiriş numunelerinin beton-donatı aderansları, 10 mm, 12 mm ve 14 mm çaplı donatıların her biri için 100 mm, 150 mm ve 200 mm kenetlenme boylarında mafsallı kiriş deneyiyle incelenmiştir. Böylece farklı kenetlenme boyunun ve farklı çaptaki donatıların betonla olan aderansları üzerine etkileri deneysel olarak belirlenmiştir. Mafsallı kiriş deneyi ile aderans dayanımı belirlenen deney numunelerine ilişkin bulgular aşağıda verilmektedir.

#### 3.1. Ø10-C300-100 mm numunesine ilişkin deney bulguları

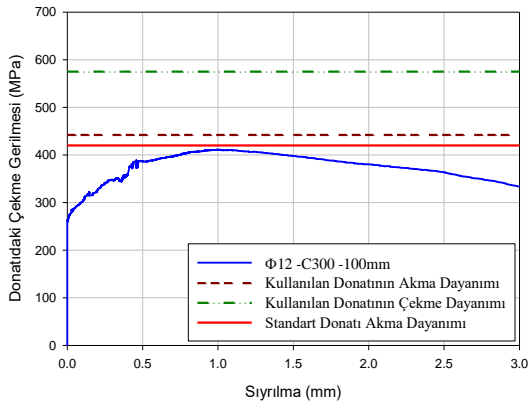
Eğilmede aderans dayanımı incelenen Ø10-C300-100 mm kodlu mafsallı kiriş numunesinin çekme gerilmesi-sıyrılma eğrisi Şekil 7'de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi donatı akma dayanımına ulaşmıştır. Akma dayanımına karşılık gelen sıyrılma değeri ise 0.713 mm olarak belirlenmiştir. Ulaşılan maksimum gerilme değeri ise 520 MPa ve buna karşılık gelen sıyrılma değeri ise 0.911 mm'dir. Yine şekilden de görüldüğü gibi, donatıda ulaşılan maksimum gerilme değeri TS 500-2000'de [18] akma dayanımı için verilen 420 MPa değerinden fazladır. Bu değere karşılık gelen sıyrılma değeri ise 0.25 mm'dir. Yüklemeye devam edildiğinde sıyrılmalar hızla artarak beton ve donatı arasındaki aderans, donatı kopmadan önce kaybolmuştur.



Şekil 7.  $\Phi 10$ -C300-100 mm kodlu numunenin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi.

### 3.2. $\Phi 12$ -C300-100 mm numunesine ilişkin deney bulguları

Eğilmede aderans dayanımı incelenen  $\Phi 12$ -C300-100 mm kodlu mafsallı kiriş numunesinin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi Şekil 8'de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi donatı akma dayanımına ulaşmamıştır. Ulaşılan maksimum gerilme değeri ise 411 MPa ve buna karşılık gelen sıyırılma değeri ise 1.00 mm'dir. 12 mm donatı çap değeri için, standart donatı akma dayanımına ulaşamamıştır. Yüklemeye devam edildiğinde sıyırılmalar hızla artarak beton ve donatı arasındaki aderans, donatı kopmadan kaybolmuştur.

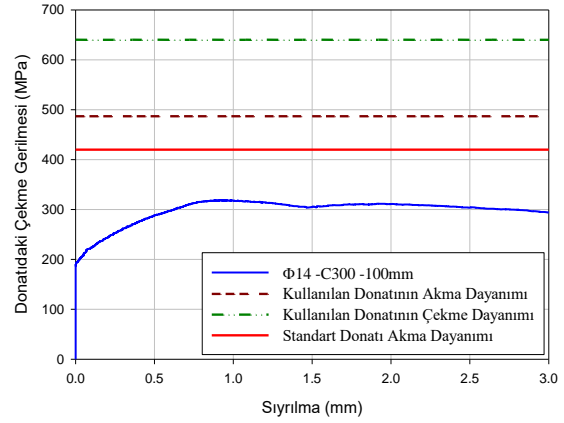


Şekil 8.  $\Phi 12$ -C300-100 mm kodlu numunenin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi

### 3.3. $\Phi 14$ -C300-100 mm Numunesine İlişkin Deney Bulguları

Eğilmede aderans dayanımı incelenen  $\Phi 14$ -C300-100 mm kodlu mafsallı kiriş numunesinin

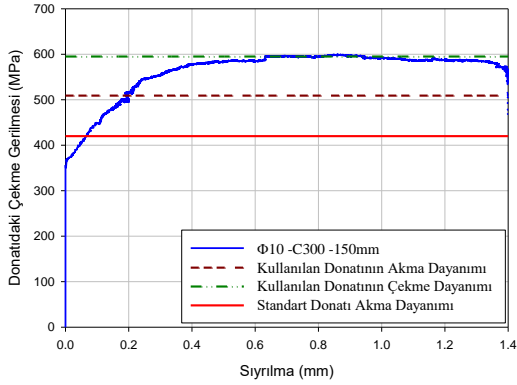
çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi Şekil 9'da verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi donatı akma dayanımına ulaşmamıştır. Ulaşılan maksimum gerilme değeri ise 319 MPa ve buna karşılık gelen sıyırılma değeri ise 0.923 mm'dir. Bu değer standart donatı akma dayanımının da çok altındadır. Yüklemeye devam edildiğinde sıyırılmalar hızla artarak beton ve donatı arasındaki aderans, donatı kopmadan kaybolmuştur.



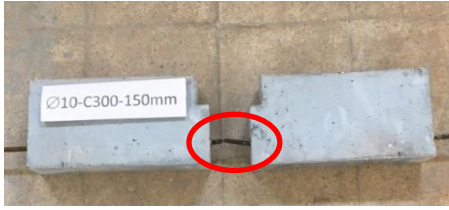
Şekil 9.  $\Phi 14$ -C300-100 mm kodlu numunenin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi.

### 3.4. $\Phi 10$ -C300-150 mm numunesine ilişkin deney bulguları

Eğilmede aderans dayanımı incelenen  $\Phi 10$ -C300-150 mm kodlu mafsallı kiriş numunesinin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi Şekil 10'de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi donatı akma dayanımına ulaşmıştır. Akma dayanımına karşılık gelen sıyırılma değeri ise 0.193 mm olarak belirlenmiştir. Yüklemeye devam edildiğinde donatı çekme dayanımına ulaşmıştır. Çekme dayanımına karşılık gelen sıyırılma değeri ise 0.860 mm'dir. 420 MPa gerilme değerinde ise 0.068 mm gibi çok küçük bir sıyırılma ölçülmüştür. Yüklemeye devam edildiğinde sıyırılmalar bir miktar daha artmış ve 1.451 mm sıyırılma değerinde aderans kaybolmadan donatı kopmuştur (Şekil 11).



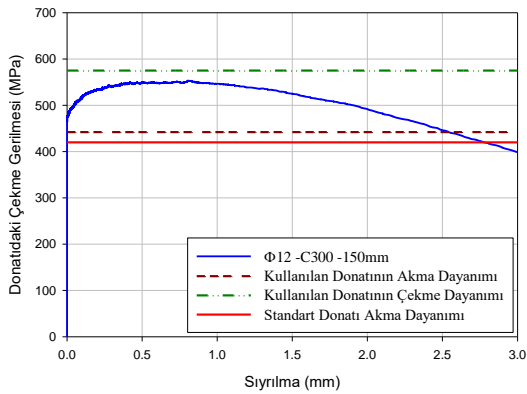
Şekil 10. Φ10-C300-150 mm kodlu numunenin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi.



Şekil 11. Donatının koptuğu kiriş numunesi.

### 3.5. Φ12-C300-150 mm numunesine ilişkin deney bulguları

Eğilmede aderans dayanımı incelenen Φ12-C300-150 mm kodlu mafsallı kiriş numunesinin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi Şekil 12'de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi donatı akma dayanımına ulaşmıştır. Donatının akma dayanımı olan 442 MPa değeri için donatıda sıyırılma meydana gelmemiştir. Ulaşılan maksimum gerilme değeri ise 553 MPa ve buna karşılık gelen sıyırılma değeri ise 0.807 mm'dir. Yüklemeye devam edildiğinde sıyırılmalar hızla artarak beton ve donatı arasındaki aderans, donatı kopmadan kaybolmuştur.

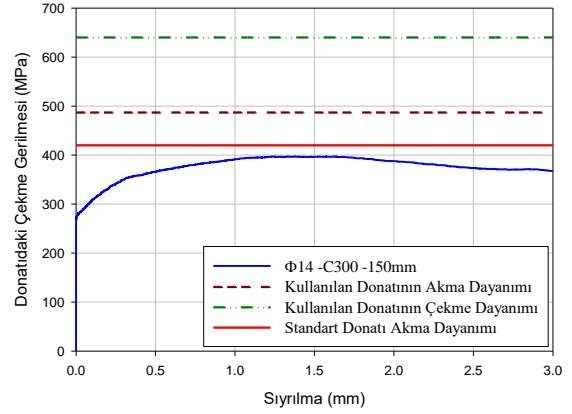


Şekil 12. Φ12-C300-150 mm kodlu numunenin

çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi.

### 3.6. Φ14-C300-150 mm numunesine ilişkin deney bulguları

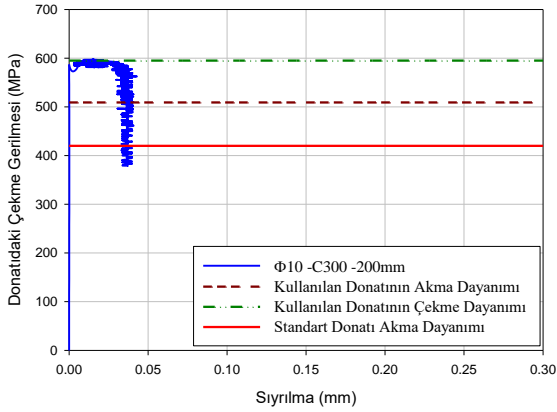
Eğilmede aderans dayanımı incelenen Φ14-C300-150 mm kodlu mafsallı kiriş numunesinin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi Şekil 13'te verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi donatı akma dayanımına ulaşmamıştır. Ulaşılan maksimum gerilme değeri ise 397 MPa ve buna karşılık gelen sıyırılma değeri ise 1.377 mm'dir. Donatıdaki gerilme standart donatı akma dayanımı olan 420 MPa'nın da altındadır. Yüklemeye devam edildiğinde sıyırılmalar hızla artarak beton ve donatı arasındaki aderans, donatı kopmadan kaybolmuştur.



Şekil 13. Φ14-C300-150 mm kodlu numunenin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi.

### 3.7. Φ10-C300-200 mm numunesine ilişkin deney bulguları

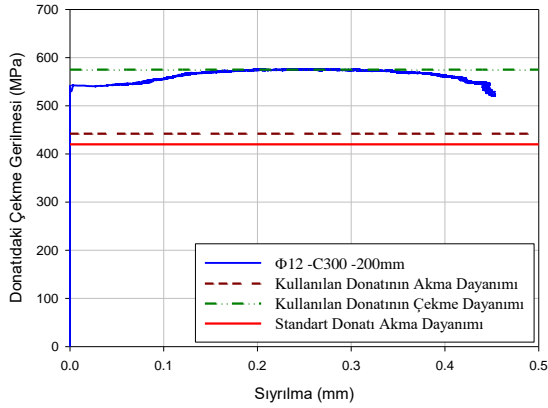
Eğilmede aderans dayanımı incelenen Φ10-C300-200 mm kodlu mafsallı kiriş numunesinin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi Şekil 14'de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi donatı akma dayanımına herhangi bir sıyırılma oluşmadan ulaşmıştır. Donatı çekme dayanımına 0.015 mm gibi çok küçük sıyırılma değeriyle ulaşmıştır ve 0.036 mm gibi çok küçük bir sıyırılma değeri ile donatı kopmuştur.



Şekil 14. Φ10-C300-200 mm kodlu numunenin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi.

### 3.8. Φ12-C300-200 mm numunesine ilişkin deney bulguları

Eğilmede aderans dayanımı incelenen Φ12-C300-200 mm kodlu mafsallı kiriş numunesinin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi Şekil 15'te verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi donatıda betona göre herhangi bir sıyırılma oluşmadan akma dayanımına ulaşılmıştır. Yükleme devam edildiğinde 0.31 mm sıyırılma ile çekme dayanımına ulaşılmıştır. Yükleme devam edildiğinde 0.45 mm sıyırılma ile donatı kopmuştur.

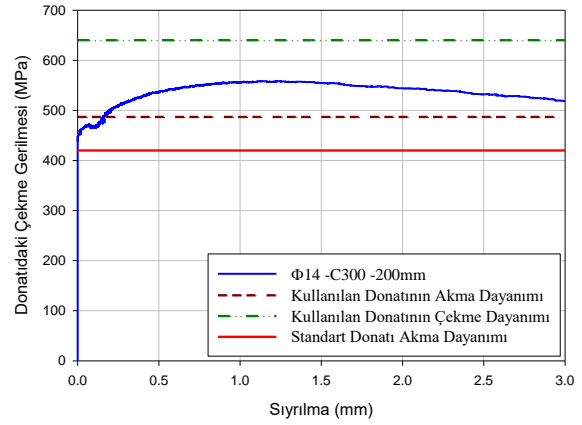


Şekil 15. Φ12-C300-200 mm kodlu numunenin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi.

### 3.9. Φ14-C300-200 mm numunesine ilişkin deney bulguları

Eğilmede aderans dayanımı incelenen Φ14-C300-200 mm kodlu mafsallı kiriş numunesinin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi Şekil 16'da

verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi donatı akma dayanımına ulaşmıştır. Akma dayanımına karşılık gelen sıyırılma değeri ise 0.153 mm olarak belirlenmiştir. Ulaşılan maksimum gerilme değeri ise 558 MPa ve buna karşılık gelen sıyırılma değeri ise 1.138 mm'dir. Yükleme devam edildiğinde sıyırılmalar hızla artarak beton ve donatı arasındaki aderans, donatı kopmadan kaybolmuştur.



Şekil 16. Φ14-C300-200 mm kodlu numunenin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrisi.

Mafsallı kiriş deneyi sonunda elde edilen çekme gerilmesi ve sıyırılmaları bazı kritik değerleri Tablo 4'te özetlenmektedir.

Tablo 4. Deneylerden elde edilen bazı bulgular.

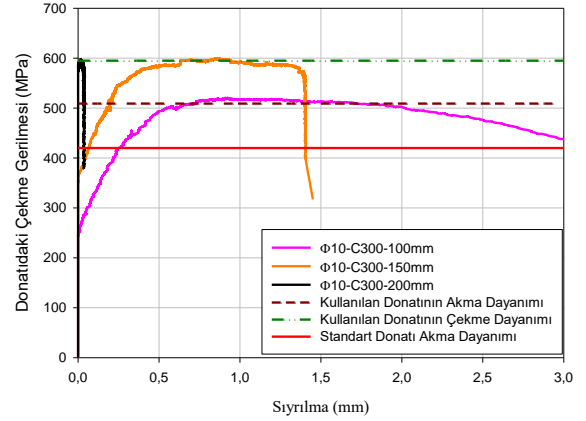
Deney Numune	Akma Dayanımı/Sıyırılma (MPa/mm)	Maksimum Gerilme/Sıyırılma (MPa/mm)	0.25 mm sıyırılma için gerilme (Mpa)	420 Mpa'daki sıyırılma (mm)
Φ10-C300-100 mm	509/0.713	520/0.911	420	0.25
Φ10-C300-150 mm	509/0.193	595/0.860	546	0.068
Φ10-C300-200 mm	509/0.015	595/0.036	-	0.0
Φ12-C300-100 mm	-	411/1.00	338	-
Φ12-C300-150 mm	442/0.0	553/0.807	537	0.0
Φ12-C300-200 mm	442/0.0	575/0.310	575	0.0
Φ14-C300-100 mm	-	319/0.923	253	-
Φ14-C300-150 mm	-	397/1.377	342	-
Φ14-C300-200 mm	487/0.153	558/1.138	508	0.0

#### 4. Tartışma

Mafsallı kirişler üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonunda elde edilen bulgular aşağıda iki başlık altında tartışılmıştır. Bunlardan birincisi kenetlenme boyunun aderans davranışına etkisi, diğeri ise donatı çapının beton-donatı aderansına etkisi üzerinedir.

##### 4.1. Kenetlenme boyunun aderans davranışına etkisi

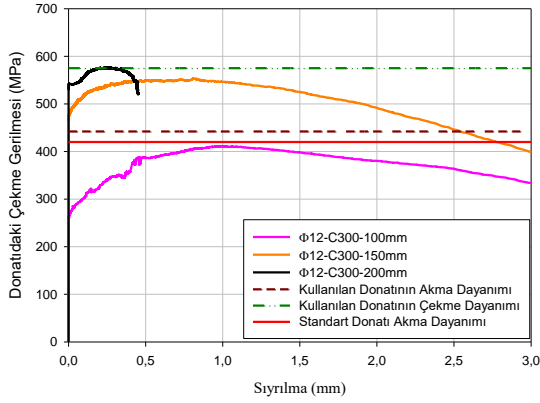
$\Phi 10$ -C300-100mm,  $\Phi 10$ -C300-150mm,  $\Phi 10$ -C300-200mm mafsallı kiriş deney numunelerinin çekme gerilmesi-sıyırılma grafiği Şekil 17’de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi aynı çap ve beton sınıfı için kenetlenme boyunun artması aderans dayanımını oldukça artırmaktadır.  $\Phi 10$ -C300-100mm numunesi için donatı akma dayanımına ulaşsa da 0.25 mm sıyırılmaya karşılık gelen gerilme değeri akma dayanımının altındadır. Bu durum kenetlenme boyunun yetersiz olduğunu göstermektedir. Zira artan yükler altında donatıdaki sıyırılmalar artmış ve beton-donatı aderansının koptuğu sıyırılma değeri olan 3 mm sınırı aşılmıştır.  $\Phi 10$ -C300-150mm numunesinde donatı akma dayanımına 0.193 mm sıyırılma ile ulaşmıştır. Bu değer 0.25 mm değerinin altında olduğunda 150 mm kenetlenme boyu için aderans dayanımının yeterli olduğu kabul edilebilir. Bu durum artan yükler altında donatı çekme dayanımına ulaşmış ve donatı koparak deneyin sonlanmasıyla desteklenmektedir.  $\Phi 10$ -C300-200mm kodlu deney numunesinde, donatıda ihmal edilebilecek sıyırılmalar ile çekme dayanımına ulaşılmış ve donatı koparak deney sonlanmıştır. 200 mm kenetlenme boyu için donatı ile beton arasındaki aderans tamdır.



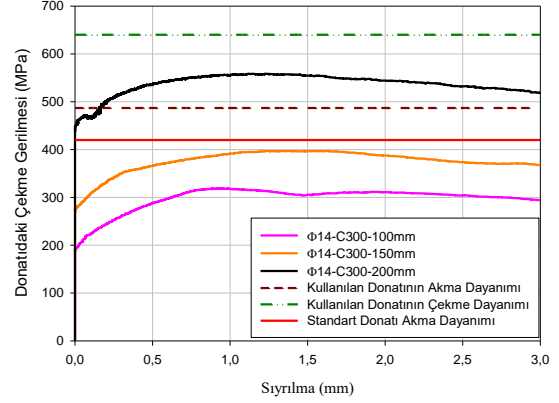
Şekil 17.  $\Phi 10$ -C300-(100mm-150mm-200mm) numunelerinin çekme gerilmesi-sıyırılma eğrileri.

$\Phi 12$ -C300-100mm,  $\Phi 12$ -C300-150mm,  $\Phi 12$ -C300-200mm mafsallı kiriş numunelerinin çekme gerilmesi-sıyırılma grafiği Şekil 18’de verilmektedir. Yine şekilden görüldüğü gibi aynı çap ve beton sınıfı için kenetlenme boyunun artması aderans dayanımını artırmaktadır.  $\Phi 12$ -C300-100mm numunesi için donatı akma dayanımına ulaşmadan beton ile donatı arasındaki aderans kaybolmuştur. Artan yükler altında donatıdaki sıyırılmalar artmış ve beton-donatı aderansının koptuğu sıyırılma değeri olan 3 mm sınırı aşılmıştır. Bu durum kenetlenme boyunun yetersiz olduğunu göstermektedir.  $\Phi 12$ -C300-150mm numunesinde donatı akma dayanımına sıyırılma oluşmadan ulaşmıştır. Bu durum 150 mm kenetlenme boyunun  $\Phi 12$ -C300-150mm numunesi için yeterli olduğunu göstermektedir. Ancak, artan yükler altında donatı çekme dayanımına ulaşmadan 3 mm sıyırılma sınırı aşılmıştır.  $\Phi 12$ -C300-200mm kodlu deney numunesinde, akma dayanımında herhangi bir sıyırılma görülmemiş ve 0.25 mm sıyırılma değeri için çekme gerilmesi 575 MPa olarak belirlenmiştir. Deney sonunda donatı kopmuştur. Bu durum  $\Phi 12$  için 200 mm kenetlenme boyunun yeterli olduğunu göstermektedir.



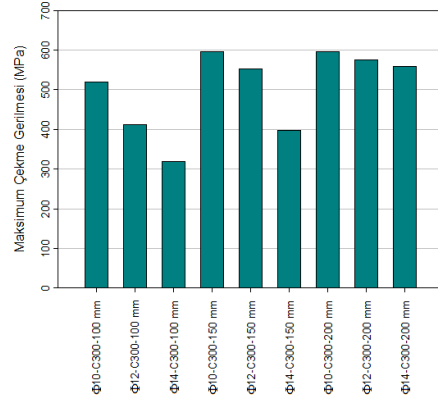


Şekil 18. Φ12-C300-(100mm-150mm-200mm) numunelerinin çekme gerilmesi-sıyrılma eğrisi.



Şekil 19. Φ14-C300-(100mm-150mm-200mm) numunelerinin çekme gerilmesi-sıyrılma eğrisi.

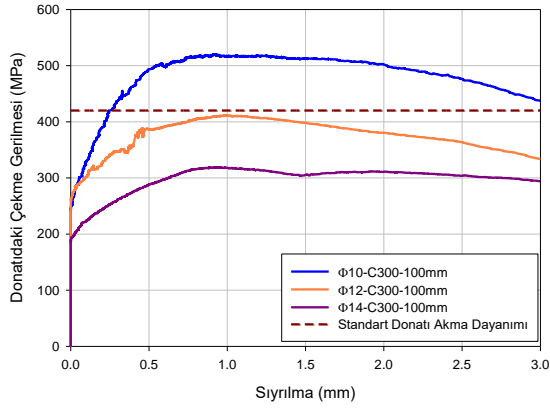
Φ14-C300-100mm, Φ14-C300-150mm, Φ14-C300-200mm mafsallı kiriş numunelerinin Çekme gerilmesi-Sıyrılma grafiği Şekil 19'da verilmektedir. Yine şekilden görüldüğü gibi aynı çap ve beton sınıfı için kenetlenme boyunun artması aderans dayanımını artırmaktadır. Φ14-C300-100mm ve Φ14-C300-150mm deney numuneleri için donatı akma dayanımına ulaşmadan beton ile donatı arasındaki aderans kaybolmuştur. Artan yükler altında donatıdaki sıyrılmalar artmış ve beton-donatı aderansının koptuğu sıyrılma değeri olan 3 mm sınırı aşılmıştır. Bu durum, 100 mm ve 150 mm kenetlenme boyunun Φ14 donatısı için beton-donatı aderansı bakımından yetersiz olduğunu göstermektedir. Φ14-C300-200mm kodlu deney numunesinde, akma dayanımına 0.153 mm sıyrılma ile ulaşılmıştır. Bu değer, 0.25 mm sıyrılma değerinin altında olduğundan Φ14 donatı için 200 mm kenetlenme boyunun yeterli olduğunu göstermektedir. Ancak, artan yükler altında donatı çekme dayanımına ulaşmadan 3 mm sıyrılma sınırı aşılmıştır. Deneyler sonunda elde edilen maksimum gerilmeler Şekil 20'de verilmektedir.



Şekil 20. Deneyler sonucu maksimum gerilmeler.

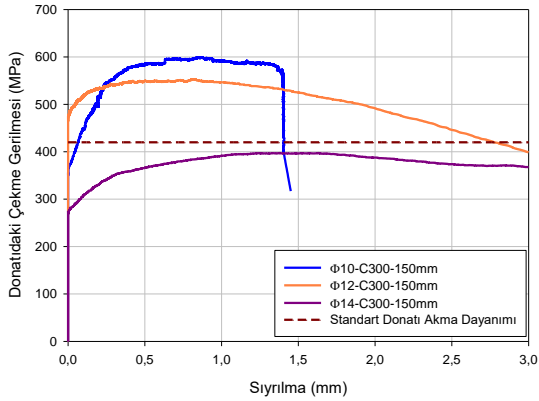
#### 4.2. Donatı çapının aderans davranışına etkisi

Farklı donatı çapının, aynı beton sınıfı ve kenetlenme boyu için aderansa etkisinin incelendiği Φ10-C300-100mm, Φ12-C300-100mm ve Φ14-C300-100mm mafsallı kiriş numunelerinin çekme gerilmesi-sıyrılma grafiği aşağıdaki Şekil 21'de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi ulaşılan en yüksek gerilme değeri 520 MPa ile Φ10 donatısındadır. En düşük gerilme ise 319 MPa ile Φ14 donatısındadır. Bu durum donatı çapındaki artışın aderans dayanımını azalttığını ortaya koymaktadır.



Şekil 21. (Φ10-Φ12-Φ14)-C300-100mm numunelerinin çekme gerilmesi-sıyrılma eğrileri.

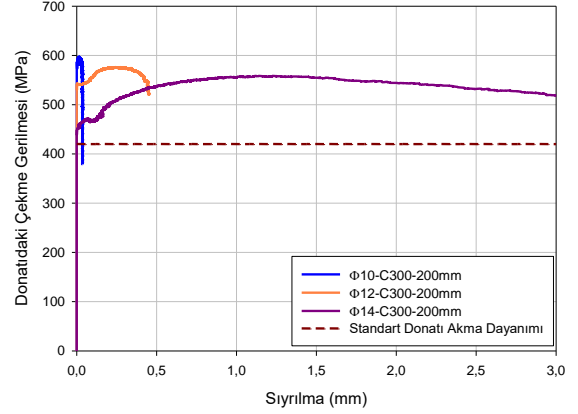
Φ10-C300-150mm, Φ12-C300-150mm ve Φ14-C300-150mm mafsallı kiriş numunelerinin çekme gerilmesi-sıyrılma grafiği aşağıdaki Şekil 22’de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi ulaşılan en yüksek gerilme değeri 595MPa ile Φ10 donatısında oluşmuş ve donatı kopmuştur. En düşük gerilme ise 397MPa ile Φ14 donatısındadır. Bu durum donatı çapındaki artışın aderans dayanımını azalttığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla yönetmeliklerde kenetlenme boyunun donatı çapına bağlı olarak verilmesinin isabetli olduğu bir kez daha ortaya konulmuş olmaktadır.



Şekil 22. (Φ10-Φ12-Φ14)-C300-150mm numunelerinin çekme gerilmesi-sıyrılma eğrileri.

Φ10-C300-200mm, Φ12-C300-200mm ve Φ14-C300-200mm mafsallı kiriş numunelerinin çekme gerilmesi-sıyrılma grafiği aşağıdaki Şekil 23’te verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi ulaşılan en yüksek gerilme değeri 595MPa ile yine Φ10 donatısında meydana gelmiş ve yine

donatı kopmuştur. Bunun yanında 200 mm kenetlenme boyu için Φ12 donatısı da çekme dayanımına ulaşmış ve kopmuştur. Bu durum TS 500-2000’de geleneksel betonlar için verilen 20Φ kenetlenme boyunun tutarlı bir rakam olduğunu ortaya koymaktadır. 200 mm kenetlenme boyu için ulaşılan en düşük gerilme ise 558MPa ile Φ14 donatısındadır.



Şekil 23. (Φ10-Φ12-Φ14)-C300-200mm numunelerinin çekme gerilmesi-sıyrılma eğrileri.

## 5. Sonuçlar ve Öneriler

Farklı kenetlenme boyları ve donatı çapları kullanılarak üretilen kiriş deney elemanları üzerinde gerçekleştirilen mafsallı kiriş deneylerinin bulgularının değerlendirilmesiyle elde edilen bazı sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

- Kenetlenme boyundaki artış beton-donatı aderansını oldukça artırmaktadır. Ulaşılan maksimum çekme gerilmelerinde 100 mm, 150 mm ve 200 mm kenetlenme boyunun kullanıldığı Φ10 donatısı için %14, Φ12 %40 ve Φ14 için ise %75’e kadar artış olduğu görülmüştür. Buna karşılık donatıda oluşan sıyrılmalar da azalmıştır.
- Aynı kenetlenme boyu için farklı çapların aderans davranışları değerlendirildiğinde büyük çaplı donatıların aderans dayanımlarının küçük çaplara göre oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu farkın düşük kenetlenme boylarında daha belirgin olduğu görülmüştür. Zira 100 mm kenetlenme boyu için Φ10, Φ12 ve Φ14 donatıları için ulaşılan maksimum çekme gerilmeleri sırasıyla 520 MPa, 411 MPa ve 319 MPa olarak belirlenmiştir. Bunun yanında, kesitin emniyetle taşıdığı çekme gerilmesine

karşılık gelen sıyrıлма değeri olan 0.25 mm sıyrıлма değeriinde oluşın çekme gerilmeleri ise  $\Phi 10$ ,  $\Phi 12$  ve  $\Phi 14$  donatıları için yine sırasıyla 420 MPa, 338 MPa ve 253 MPa olarak ölçülmüştür.

- Düşük çaptaki donatılar için, TS 500-2000’de önerilen 20 $\Phi$  kenetlenme boyunun fazla olduğu ancak yapılar da daha çok kullanılan  $\Phi 12$  ve  $\Phi 14$  donatıları için uygun olduğu sonucu ortaya konmuştur.

Farklı kenetlenme boyu ve donatı çapı için gerçekleştirilen bu çalışmanın yanında, farklı beton sınıfları ve daha büyük çapta donatıların kullanıldığı deneysel çalışmaların da yapılması gerekmektedir. Bu şekilde, TS 500-2000’de [17] sadece geleneksel betonları kapsayan bağıntılara ilave olarak yüksek performanslı betonlar için de geçerli olan bağıntıların sunulması için yeterli veri elde edilebileceği de belirtilmelidir.

## 6. Kaynaklar

1. Arda, T.S. (1968). Betonarmede Aderans Konusunda Bir Derleme, 1. Baskı, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul.
2. Arslan, M. E. (2007). Eğilmede Taşıyıcı Hafif Beton-Donatı Aderansının Geleneksel Beton-Donatı Aderansıyla Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimler Enstitüsü 104s.
3. Arslan M. E. and Durmuş, A. (2011). Investigation of bond behavior between lightweight aggregate concrete and steel rebar using bending test. *Computers & concrete*, **8(4)**: 465-472.
4. Ersoy, U. ve Özcebe, G. (2001). Betonarme: Temel İlkeler TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap, Genişletilmiş Yeni Baskı, Evrim Yayınevi, İstanbul.
5. Dahil, H. (2001). Yüksek Performanslı Beton-Donatı Aderansının Geleneksel Beton-Donatı Aderansıyla Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimler Enstitüsü, 93s.
6. Hüssem, M. ve Durmuş A. (1995). Hafif Beton-Donatı Aderansının Geleneksel Beton Donatı Aderansıyla Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi, *Türkiye İnşaat Mühendisliği XIII. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı*, İstanbul, s. 341-354
7. Kankam, C. K. (2004). Bond Strength of Reinforcing Steel Bars Milled From Scrap Metals. *Materials and Design*, **25**: 231-238.
8. MacGregor, J. G. (1997). Reinforced Concrete : Mechanic sand Desing”, Third Edition, Prentice Hall, New Jersey.
9. Yeih, W., Chang, J. J. and Tsai C.L. (2004). Enhancement of the Bond Strength of Epoxy Coated Steel by the Addition of Fly Ash. *Cement & Concrete Composites*. **26**: 310-321.
10. El-Hawary, M. M. (1999). Evaluation of Bond Strength of Epoxy-Coated Bars in Concrete Exposed to Marine Environment. *Construction and Building Materials*. **13**: 357-362.
11. Arel, H. Ş. (2012). Değişik Parametrelerin Beton ile Çelik Donatı Aderansına Etkisi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 223s.
12. Benli, A. (2007). Kendiliğinden sıkışın betondaki donatı aderansının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 121s.
13. A. Beycioğlu (2013). Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Beton İle Donatı Aderansı İlişkisinin Araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
14. Guneyisi, E., Gesoglu, M. and Ipek, S. (2013). Effect of steel fiber addition and aspect ratio on bond strength of cold-bond ed fly ash light weight aggregate concretes. *Construction and Building Materials*. **47**: 358-365.
15. Beycioğlu, A., Arslan, M.E., Sallı Bideci, Ö., Bideci A., Emiroğlu, M. (2015). Bond Behavior of Lightweight Concretes Containing Coated Pumice Aggregate: Hinged Beam Approach. *Computers and Concrete*, **16**, 6, 911-920.
16. TS EN 197-1 (2002). Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.
17. BS 4449:2005+A2:2009 (2009). Steel for the reinforcement of concrete: Weldable reinforcing steel: Bar, coil and decoiled product, London.
18. TS 500-2000 (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TSE, Ankara.



## Kaotik Fonksiyonlar İle EKG Sinyalleri Kullanarak Kişisel Bilgi Şifrelemenin Matematiksel Kriptanalizi

M.Tuncay GENÇOĞLU

Fırat Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, 23119 Elazığ, Türkiye  
mt.gencoglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 19/06/2017; Kabul/Accepted: 12.06.2018)

### Özet

Kaotik sistem ve kriptografi bazı ortak özelliklere sahiptir. Kaotik sistem ve kriptosistem arasındaki yakın ilişki nedeniyle, araştırmacılar kaotik sistem ile kriptosistemi birleştirmeye çalışırlar. Bu çalışmada verilerin EKG sinyalleri ve kaotik fonksiyonlar ile veri şifrelemeyi amaçlayan bir şifreleme algoritmasının güvenlik analizi yapılmıştır. Önerilen algoritmada metin şifreleme Lojistik harita ve resim şifreleme de ise Henon haritası kullanılarak metin ve resim verileri aynı anda şifrelenmektedir. Ayrıca şifreleme algoritmasının kişiselleştirilmesi amacıyla algoritmada kullanılan kaotik fonksiyonların başlangıç şartlarını ve kontrol parametrelerini belirlemek için EKG sinyalleri kullanılmıştır. Yapılan bu kriptanaliz çalışmasında bahsedilen işlemin yetersizliği ve önerilen yöntemin zayıf yönleri belirlenmiştir. Şifreleme algoritmasının anahtar alanının gerekli güvenlik seviyesini sağlamak için yeterli kapasiteye sahip olmadığı ve gizli anahtarın seçilen düz metin saldırısıyla yalnızca bir tane düz metin-şifreli metin çifti ile elde edilebileceği ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Kaos, Kriptografi, Kriptanaliz.

## Mathematical Cryptanalysis of Personalized Information Encryption Using ECG Signals with Chaotic Functions

### Abstract

Chaotic system and cryptography have some common characteristics. Due to the close relationship between the chaotic system and the cryptosystem, researchers are trying to combine the chaotic system with the cryptosystem. In this study, Security analysis of an encryption algorithm aimed data encryption with ECG signals and chaotic functions has been performed. In the proposed algorithm for cryptanalysed study; the logistic map in text encryption, Henon map in picture encryption using the text and image data can be encrypted at the same time. In addition, ECG signals have been used to determine the initial conditions and control parameters of the chaotic functions used in the algorithm with the aim of personalizing the encryption algorithm. In this cryptanalysis study, the inadequacy of the mentioned process and the weaknesses of the proposed method have been determined. It has been shown that the encryption field of the encryption algorithm does not have sufficient capacity to provide the required security level and that the secret key can be obtained with only one plaintext-encrypted text pair with the selected plaintext attack.

**Keywords:** Laplace Transform, Cryptography, Cryptanalysis.

### 1. Giriş

Kriptoloji biliminin asıl amacı, internet gibi kamusal iletişim kanallarında bulunan bir saldırganın tehditlerine karşı, gönderen ve alıcı arasındaki iletişimi güvenli olarak sağlamaktır. Kaotik sistemin özelliklerini kullanarak kriptosistem tasarımı son yirmi yılda bir çok araştırmacının ilgisini çekmiştir [1,2,5,15,20]. Fakat araştırmacıların çoğu yapılan tasarım çalışmalarının bir kaçında tesadüfiliğin kaynağı olarak kaotik sistemlerle sunulan zengin

dinamikler üzerine yoğunlaştıkları için bir kriptosistem tasarlanırken gözönünde bulundurulması gereken temel kriterlere dikkat etmemişlerdir [1-3,6,10,16,19-25,27]. Nihayetinde, kaos temelli kriptoloji, bir uygulama alanı olarak, temel kriptoloji literatürüne uzak kalır.

Bu çalışmada, EKG sinyalleri ve kaotik fonksiyonlarla veri şifrelemeyi amaçlayan bir şifreleme algoritmasının güvenlik analizi yapılmıştır [9]. Önerilen şifreleme algoritmasında metin ve resim verileri aynı anda

şifrelenebilmektedir. Metin şifreleme için Lojistik map ve resim şifreleme için Henon map kullanılmıştır. EKG sinyalleri, şifreleme algoritmasında kullanılan kaotik fonksiyonların başlangıç şartlarını ve kontrol parametrelerini belirlemek için kullanılmıştır. Bu işlemle şifreleme algoritmasının kişiselleştirilmesi amaçlanmıştır. Önerilen algoritmanın güvenlik analizi sadece histogram analizi ve deneysel sonuçlarla yapılmıştır.

Önceki araştırmalarda da olduğu gibi yazarlar[9], kaotik sistemlerin en belirgin özelliği olan başlangıç şartları ve kontrol parametrelerine aşırı bağımlılık gösteren tahmin edilemeyen tesadüfi yörüngelerle verinin şifrelemesini amaçlamışlardır. Önerilen algoritmayı daha karmaşık, sağlam ve güvenilir hale getirmek için şifreleme sistemine EKG sinyalleri ile kaotik fonksiyonların başlangıç şartlarının belirlendiği bir aşama eklenmiştir. Ancak, yapılan kriptanaliz çalışmasında; şifreleme algoritmasının anahtar alanının gerekli güvenlik seviyesini sağlamak için yeterli kapasiteye sahip olmadığı gösterilmiştir. Ayrıca, algoritmanın gizli parametresi olan anahtarın seçilen düz metin saldırısıyla yalnızca bir düz metin-şifreli metin çifti ile elde edilebileceği gösterilmiştir.

Çalışmanın ana hatları şu şekildedir; Bir sonraki bölümde önerilen şifreleme algoritması detaylarıyla açıklanmıştır.3. Bölümde, kaos tabanlı şifreleme sisteminin güvenlik analizi yapılırken gözönüne alınması gereken şartlar kısaca açıklanmış ve önerilen şifreleme algoritması basit bir matematiksel modelle ifade edilmiştir. Ardından bu matematik model üzerinde uygulaması gösterilmiştir. Son bölümde, elde edilen sonuçlar tartışılmış ve bazı genel öneriler sunulmuştur.

## 2.Şifreleme Algoritmasının Açıklaması

Bu bölümde şifreleme algoritması[9] detayları ile açıklanmaktadır. Şifreleme algoritması iki temel kısımdan oluşur. 1. Kısımda, EKG sinyallerini toplamak için kullanıcılardan bir cihaz geliştirilmiş, bu cihaz yardımıyla kullanıcının kişisel özellikleri EKG sinyallerinden tahmin edilmiştir. Şifreleme algoritmasının 2. Kısımında, EKG sinyallerinden elde edilen bireysel özellikler kaotik fonksiyonların öngörülemez tesadüfi

yörüngelerini üretmek için başlangıç şartları ve kontrol parametreleri olarak kullanılmıştır. Şifreleme işlemi üretilen kaotik öngörülemez tesadüfi yörüngeler yardımıyla veri karıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Şifreleme adımları ise şu şekildedir;

1. Adım: Kullanıcının bireysel özelliklerinden oluşan ve Lojistik ve Henon haritaları için başlangıç anahtarı olarak kullanılan EKG sinyalleri, EKG çıkartma programı ile toplanır. Daha sonra kaotik fonksiyonlar kullanılarak bir öngörülemez tesadüfi yörünge üretilir.

2. Adım: Kaotik fonksiyonların kontrol parametreleri kullanılarak elde edilen kaotik yörünge çıktısındaki verilerle bir gizli şifreleme anahtar serisi üretim sistemi kurulur.

3. Adım: Şifrelenecek döküman hem metin hemde resim içeriyorsa, bunlar birbirinden ayrılır.

4. Adım: Henon map görüntü verilerinin şifrelemesi için kullanılır. Şifrelenecek verilerin koordinatlarının piksel değerleri yer değiştirilir. Yani iki boyutlu Henon haritasının yörüngeleri kullanılarak şifrelenecek verilerin yatay ve dikey karıştırılması yapılır.

5. Adım: Lojistik map metin verisinin şifrelemesi için kullanılır. Şifreli metin formatı metin dosyasına dönüştürülür. Satır sonlandırıcılarıyla dizi elde edilir ve dosyanın sonuna kadar karakterler ASCII kodlarına dönüştürülür. Şifreli metin, kaotik Lojistik harita kullanılarak her karakter ASCII kodları ile yer değiştirilir. Yani metin içindeki her karaktere karşılık gelen ASCII kodlarının Lojistik harita yardımıyla karıştırılması ile şifreleme işlemi gerçekleşir.

6. Adım: Şifreli metin ve resim oluşturulur. Yani şifreli metin ve resim verileri birleştirilerek şifreleme işlemi tamamlanır.

## 3.Önerilen Algoritmanın Matematiksel Kriptanalizi

Kaotik sistemlerin, kriptografik yapıların tasarımında temel unsur olarak kullanılması durumunda, yalnızca istatistiksel test yöntemlerini kullanarak şifreleme sisteminin güvenilirliğini değerlendirmek yetersiz bir analiz olacaktır.

Chen ve arkadaşları tarafından yapılan bu çalışmada şifreleme mimarisi

$$C=E(K, P) \quad (1)$$

gibi basit bir matematiksel modelle ifade edilebilir. Bu modelde;

E: Şifreleme Algoritması

K: Kaotik öngörülemeyen tesadüfi yörüngeyle iletilen gizli anahtar

P: Orjinal veri

C: Şifrelenmiş veri

olarak tanımlanmıştır. Analizi yapılan algoritmada; kontrol parametreleri, başlangıç şartları ve kaotik fonksiyonların iterasyon sayısı gizli anahtar olarak kullanılmıştır. Ancak (1) denkleminde görüldüğü gibi aslında, EKG sinyalleri ile veya kaotik fonksiyonlarla şifreleme süreci arasında herhangi bir ilişki bulunmamaktadır. Şöyleki; K parametresine sahip olan herkes bir anahtarı şifreleyebilir yada herhangi bir veriyi deşifreleyebilir. Yani K parametresi şifreleme algoritmasının gizli anahtarı ile eşdeğerdir. [20] de Solak şöyle demektedir: “Kaos tabanlı şifrelere karşı belirli bir saldırı sınıfı, kriptosistemin kaotik kısmını bypass etmeyi amaçlar. Bu sınıfta, şifreleme algoritması, kaotik alt sistemlerin bir dizi gizli haritalar veya parametrelerle değiştirilmesine eşdeğer bir biçimde ifade edilir.” Bu durumda, K'nın nasıl elde edileceği araştırılmalıdır.

Fiziksel bir sistemin davranışı onu nasıl tanımladığına bağlı değildir. Soyut bir dinamik sistemi tanımlayan denklemler, sadece onun durumlarının belirli bir parametrisasyonuna göre anlamlıdır. Eğer parametrisasyonu değiştirirsek, dinamik denklemler, benzer fiziksel durumların değişim kanunlarıyla ilişkilerine göre değiştirilmelidir [4,7].

Örneğin  $x_{n+1} = f(x)$  için  $f: X \rightarrow X$  ile verilen bir değişim kuralı (evrim yasası) na sahip  $x \in X$  koordinatları tarafından parametrelendirilen fiziksel durumlara sahip olduğumuzu varsayalım;  $y \in Y$  olmak üzere  $y = C(x)$  ile belirtilen yeni bir koordinat sistemine geçerseniz, dinamik denklemler  $y_{n+1} = g(y_n)$  olur, burada  $g: Y \rightarrow Y$  bağıntısı sağlanır. Dolayısıyla;

$$C(f(x)) = g(C(x)) \quad (2)$$

elde edilir.

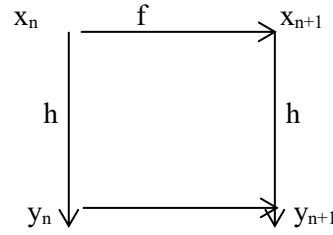
(2) denklemini basitçe bir taraftan

$$y_{n+1} = C(x_{n+1}) = C(f(x_n))$$

diğer taraftan

$$y_{n+1} = C(y_n) = g(C(x_n))$$

şeklinde ifade edilir. Bu şekil 1 de verilen komutatatif diagram ile özetlenmiştir.



Şekil 1. Eşleniklik kavramı için Komutatatif Diagram

Eşleniklik kavramı benzerliği açık bir şekilde göstermenin bir yoludur. Eğer açık resim-metin ve şifreli resim-metin arasındaki ilişki kaotik bağıntılarla belirlenirse, K parametresi (2)'den elde edilebilir. (2) denklemini  $x_n$  den  $y_{n+1}$  'e giden iki yol karşılaştırılarak düzenlendiğinde;

$$\begin{cases} x_{n+1} = 1 - ax_n^2 + by_n \\ y_{n+1} = x_n \end{cases} \quad (3)$$

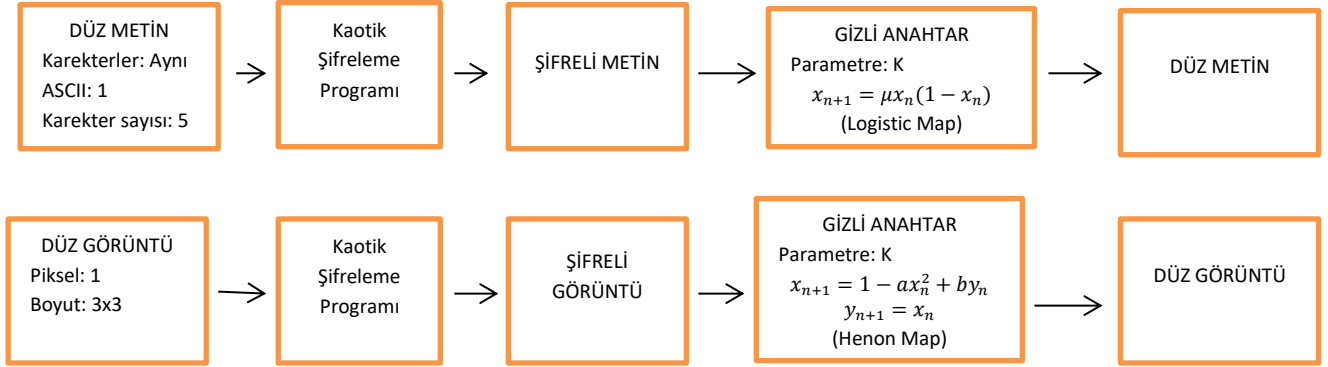
$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n) \quad (4)$$

Denklemleri elde edilir.

K parametresi bilinen saldırı yöntemleri kullanılarak elde edilmeye çalışılır. Bu amaçla seçilen düz resim-metin saldırısı kullanılabilir. Seçilen düz resim-metin saldırısında, saldırgan bir düz resim-metin seçer ve bir şekilde karşılık gelen şifreli resim-metni elde eder. Düz-Şifreli resim-metin çifti analiz edilerek, gizli parametreleri ortaya çıkarmaya çalışır. Tüm sembollerini benzer karakterlerden oluşan bir resim verisi yada tüm pikselleri aynı değerlere sahip resim verisi için, şifreli veri elde edildiğinde K parametresi kolaylıkla elde edilebilir. Örneğin; tüm piksel değerleri 1 olan küçük bir 3x3 boyutlu görüntüsünü düz görüntü olarak seçelim ve bu görüntüye karşılık gelen şifreli görüntüyü önerilen yöntemle elde edelim. Düz görüntü ile şifreli görüntü Henon map ile belirlendiğinden K

parametresi (3)'den elde edilebilir. Benzer şekilde tüm karakterleri aynı ve ASCII kodu 1 olan 5 karakterli bir metin düz metin olarak seçilsin. Eğer bu veriye karşılık gelen şifreli metin elde edilirse, K parametresi (4) denklemi kullanılarak elde edilebilir. Sonuç olarak algoritmanın gizli

anahtarını seçilen yalnız bir tane düz metin-şifreli metin çifti kullanılarak elde edilebilir. Sonuç olarak algoritmanın gizli anahtarını seçilen yalnız bir tane düz metin-şifreli metin çifti kullanılarak elde edilebilir. Bu işlem şekil 2. de özetlenmiştir.



Şekil 2. Düz Metin-Görüntü Kriptanaliz Akış Şeması

Şifreleme algoritmasının diğer bir zayıf yönü ise; algoritmanın gizli anahtarları başlangıç şartları ve kontrol parametreleri EKG verisiyle belirlenen kaotik fonksiyonlarla üretilir. Lojistik harita ve Henon haritası kullanılarak şifreleme yapılır. Ancak hem Lojistik map hemde Henon map belirli parametre değerleri arasında kaotik davranış sergilerler. Algoritmanın konfizyon özelliğinin sağlanması kaotik iterasyonlara bağlı olduğundan, EKG verilerinden elde edilen parametre değerlerinin kaotik davranış sergilemediği durumda, şifreleme algoritmasının ana gereksinimi olan konfizyon özelliği sağlanamayacaktır. Sonuç olarak düz metin-şifreli metin çifti arasındaki ilişki kolaylıkla açığa çıkacaktır. Bu tür bir kriptanaliz çalışması daha önceden Chee'nin kaotik şifrelemesi için [8] Arroyo ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [6]. Ayrıntılı bir analiz için incelenebilir.

Analiz edilen algoritmanın önemli bir eksikliği ise; şifreleme mimarisinin difüzyon özelliğini sağlamamasıdır. Modern şifreleme algoritmalarının bir kaçı difüzyon özelliğini sağlamak için dairesel fonksiyonları defalarca tekrar ederek bunu gerçekleştirir. Önerilen algoritmada, şifreleme işlemi bir turda gerçekleştirilir.

#### 4. Sonuç

Chen ve arkadaşları tarafından yeni bir görüntü şifreleme önerilmiştir [9]. Önerilen algoritmada, EKG sinyalleri ve kaotik fonksiyonlar gibi çeşitli yapılar kullanılarak şifreleme mimarisinin güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Ancak, 3. Bölümde detaylı olarak ifade edildiği gibi; anahtar alanının boyutunun sadece istatistiksel testler ve kullanılan parametrelerin sayısına bağlı olarak ortaya konulması güvenlik analizi için yeterli değildir. Yalnızca daha karmaşık, öngörülemez, bireysel özellikli güvenilir yapılar kullanılarak güçlü kriptografik sistemler tasarlamak tek başına yeterli değildir. Aksi takdirde basit bir matematik bağıntı olan Lojistik map ve Henon map ele alındığında önerilen algoritmanın gizli anahtarları kolaylıkla elde edilebilecektir. Bu nedenle, mimaride kullanılacak olan unsurlar ve bu unsurların kullanılma şekline dikkat edilmelidir.

#### 5. Kaynaklar

1. Alvarez G., Amigo J. M., Arroyo D., Li S., (2011). "Lessons Learnt from the Cryptanalysis of Chaos-Based Ciphers", in: L. Kocarev, S. Lian (Eds.), Chaos Based Cryptography Theory Algorithms and Applications, Springer-Verlag, 257-295.



2. Alvarez G., Li S., (2006) “Some basic cryptographic requirements for chaos-based cryptosystems”. *International Journal of Bifurcation Chaos* **16/8**,2129–2151.
3. Alvarez G., Li S., (2006). “Breaking an encryption scheme based on chaotic baker map”. *Physics Letters A* **352**,78–82.
4. Alligood K., Sauer T., Yorke J., (1997). *Chaos an introduction to dynamical systems*, Springer-Verlag.
5. Amigo M., Kocarev L., Szczapanski J., (2007). “Theory and practice of chaotic cryptography”. *Physics Letters A* **366**, 211-216.
6. Arroyo D., Alvarez G., Li S., Li C., Nunez J., (2008). “Cryptanalysis of a discrete-time synchronous chaotic encryption system”. *Physics Letters A*, **372**,1034–1039.
7. Katok A., Hasselblatt B., (1995). *Introduction to the Modern Theory of Dynamical Systems*. Cambridge University Press, Cambridge.
8. Chee C. Y., Xu D., (2006). “Chaotic encryption using discrete-time synchronous chaos”. *Physics Letters A* **348**, 284–292.
9. Chen C., Lin C., Chiang C., Lin S., (2012). “Personalized information encryption using ECG signals with chaotic functions”. *Information Sciences* **19**, 125–140.
10. Çokal C., Solak E., (2009). “Cryptanalysis of a chaos-based image encryption algorithm”. *Physics Letters A* **373**,1357–1360.
11. Fridrich J., (1998). “Symmetric ciphers based on two-dimensional chaotic maps”. *International Journal of Bifurcation and Chaos* **8/6**,1259–1284.
12. Gao T., Chen Z., (2008). “Image encryption based on a new total shuffling algorithm”. *Chaos, Solitons & Fractals* **38/1**, 213–220.
13. Guan Z.-H., Huang F., Guan W., (2005). “Chaos-based image encryption algorithm”, *Physics Letters A*, **346**, 153 -157.
14. Huang C.K., Nien H.H., (2009). “Multi chaotic systems based pixel shuffle for image encryption”. *Optics Communications*, **282/11**, 2123-2127.
15. Jakimoski G., Kocarev L., (2001). “Chaos and cryptography: block encryption ciphers”. *IEEE Trans Circ Syst-I* **48/2**, 163–169.
16. Li C., Li S., Lo K., (2011). “Breaking a modified substitution–diffusion image cipher based on chaotic standard and logistic maps”. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* **16/2**, 837-843.
17. Pisarchik A.N., Flores-Carmona N.J., Carpio-Valadez M., (2006). “Encryption and decryption of images with chaotic map lattices”. *Chaos* **16/3**.
18. Patidar V., Pareek N.K., Sud K.K., (2009). “A new substitution-diffusion based image cipher using chaotic standard and logistic maps”. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* **14/7**, 3056–3075.
19. Özkaynak F., Özer A. B., Yavuz S., (2012). Cryptanalysis of a novel image encryption scheme based on improved hyperchaotic sequences. *Optics Communications* **285/24**, 4946–4948.
20. Solak E., Cryptanalysis of Chaotic Ciphers, in: L. Kocarev, S. Lian (Eds.), (2011). *Chaos Based Cryptography Theory Algorithms and Applications*, Springer-Verlag, 227-256.
21. Ying-Qian Z., Xing-Yuan W., (2014). Analysis and improvement of a chaos-based symmetric image encryption scheme using a bit-level permutation. *Nonlinear Dynamics*, **77/3**, 687–698.
22. Solak E., Rhouma R., Belghith S., (2010). Cryptanalysis of a multi-chaotic systems based image cryptosystem. *Optics Communications* **283/2**, 232-236.
23. Chengqing L., Tao X., Qi L., Ge C., (2014). Cryptanalyzing image encryption using chaotic logistic map. *Nonlinear Dynamics*, **78/2**, 1545–1551.
24. Solak E., Çokal C., (2008). Cryptanalysis of a cryptosystem based on discretized two dimensional chaotic maps. *Physics Letters A* **372/46**, 6922–6924.
25. Özkaynak F., Yavuz S., (2014). Analysis and improvement of a novel image fusion encryption algorithm based on DNA sequence operation and hyper-chaotic systems. *Nonlinear Dynamics*, **78/2**, 1311–1320.
26. Vrahatis M.N., Tsirogiannis G.A., Laskari E.C., (2010). Novel orbit based symmetric cryptosystems. *Mathematical and Computer Modelling*, Volume **51**, 239-246.
27. Wang X., He G., (2011). Cryptanalysis on a novel image encryption method based on total shuffling scheme. *Optics Communications*, **284/24**, 5804-5807.
28. Xiang T., Wong K.-W., Liao X. (2007). A novel symmetrical cryptosystem based on discretized two-dimensional chaotic map. *Physics Letters A* **364/3**, 252–258.
29. Zhu Z., Zhang W., Wong K, Yu H., (2011). A chaos-based symmetric image encryption scheme using a bit-level permutation. *Information Sciences*, **181/6**, 1171-1186.



## 4,4'-Diaminobifenil'in Yumuşak Çeliğin Hidroklorik Asitteki Korozyonuna Karşı İnhibisyon Etkisi Ve Kuantum Hesaplamaları

Reşit YILDIZ<sup>1\*</sup>, İlyas DEHRİ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mardin Artuklu Üniversitesi, Sağlık Yüksekokulu, Hemşirelik Bölümü, 47100, Mardin, Türkiye

<sup>2</sup>Çukurova Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü., 01330, Adana, Türkiye

\*resityildiz@artuklu.edu.tr

(Geliş/Received: 21.07.2017; Kabul/Accepted: 21.03.2018)

### Özet

Bu çalışmada 4,4'-Diaminobifenil'in (4-DB) inhibitör olarak kullanımı araştırılmıştır. Elektrokimyasal teknikler (EIS ve polarizasyon ölçümleri) ve kuantum kimyasal hesaplamalar ((DFT) ile B3LYP/6-311++G (d, p)) uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; 4-DB'nin inhibisyon etkinliği artan konsantrasyon ile artış göstermiştir. Polarizasyon ölçümleri 4-DB'nin anodik reaksiyonların hızını azalttığını göstermektedir. 4-DB'nin inhibisyon etkinliği yüksek HOMO enerjisi (-0,189 eV), dipol moment (0, 6121 D) ve düşük LUMO enerjisi (-0,019 eV) ile ilişkilendirilmiştir. Adsorpsiyonun Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğu saptanmıştır. Adsorpsiyon standart serbest entalpi ( $\Delta G^{\circ}_{ads}$ ) değeri hesaplanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Korozyon, Yumuşak Çelik, SEM, EIS, Quantum Chemical Calculations

### The Inhibition Effect Of 4,4'-Diaminobiphenyl Against The Corrosion Of Mild Steel In Hcl And The Quantum Calculations

#### Abstract

In this study, 4,4'-Diaminobiphenyl (4-DB) is investigated usage of inhibitor molecule. Electrochemical techniques (EIS and polarization measurements) and quantum chemical calculations ((DFT) with the B3LYP/6-311++G (d, p)) were obtained. The results showed that; inhibition efficiencies increase with increasing concentration of 4-DB. It is found that 4-DB retards anodic reactions according to polarization measurements. The inhibition efficiency of 4-DB is attributed to the high value of  $E_{HOMO}$  (-0,189 eV), dipole moment  $\mu$  (0,6121 D) and low value of  $E_{LUMO}$  (-0,019 eV). This inhibitor functions through adsorption following Langmuir isotherm. The value of adsorption free energy of ( $\Delta G^{\circ}_{ads}$ ) was also calculated.

**Keywords:** Corrosion, Mild Steel, SEM, EIS, Kuantum Kimyasal Hesaplamaları

#### 1. Giriş

Endüstrinin hemen her alanında kullanılan yumuşak çelik gibi metaller, tank ve tepkime kaplarının üretimi gibi birçok yerde kullanılırlar. Bu sebeple de genelde asidik çözeltilerle temas halinde olduklarından, korozyon önemli bir tehlike arz etmektedir. Bu yolla, malzemenin korozyona karşı korunmasının en etkili yollarından birisi de ortama inhibitör ilave etmektir. İnhibitör, aşındırıcı ortama eklendiği zaman korozyon hızını azaltan maddelerdir. Etkileri, hem anodik hemde katodik tepkimeleri yavaşlatarak korozyon hızını azaltabilirler. Korozyon inhibitörleri çeşitli ortamlara

eklenirler: Soğutma sistemleri, temizleme banyoları, çeşitli rafineri birimleri, kimyasal işlemler, buhar jeneratörleri vb. otomobil radyatörlerinde kullanılan antifriz karışımının içine veya ısıtma sisteminde kullanılan suyun içine de inhibitör eklenir [1-6].

Başlıca bilinen korozyon inhibitörleri yapısında N, S, O gibi atomları içerirler. Bu yapılar  $\pi$  bağlarına ve çiftleşmemiş elektron çiftine sahip organik yapılardır. Organik moleküldeki bu tür atomların inhibisyon etkisi  $O < N < S < P$  sırasıyla artmaktadır. İnhibitörün verimi, maddenin kimyasal yapısına, metalin yüzey yüküne ve organik molekül ile metal yüzeyi arasındaki etkileşimin tipine bağlıdır. [1-

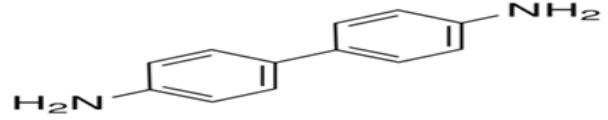
8]. Bu bileşiklerin en büyük avantajı ise yapılarındaki konjuge çift bağlar ve düzlemsel yapıdaki hetero siklik halkada bulunan N atomudur. Bu sayede metal yüzeyine adsorpsiyon daha kolay gerçekleşebilir.

Bu çalışmada, inhibitör madde olarak 4,4'-Diaminobifenil'in (4-DB) yumuşak çeliğin (YÇ) korozyon davranışına etkisi araştırılmıştır. YÇ'nin 4-DB içermeyen ve içeren 0,1 M HCl çözeltilerindeki açık devre potansiyellerinin zamanla değişimi takip edilmiştir. Ayrıca farklı daldırma sürelerinde elektrokimyasal impedans spektroskopisi ve polarizasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 4-DB'nin YÇ yüzeyindeki adsorpsiyonu deneysel ve kuantum teorik yöntemlerle incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metod

Deneysel çalışmalar, elektrokimyasal olmayan ve elektrokimyasal yöntem olmak üzere iki kısımda gerçekleştirilmiştir. YÇ kimyasal bileşimi; (%); 0,17 C, 1,40 Mn, 0,045 P, 0,045 S, 0,009 N ve 98,376 Fe'dir. Yüzey alanı 0,5 cm<sup>2</sup> dir. Çalışma elektrotlarının hazırlanması için silindir şeklindeki YÇ çubuktan 5'er cm boyutunda parçalar kesilmiştir. Kesilen parçaların alt yüzeylerinden bir tanesine delik açılarak bu deliğe bakır tel yerleştirilmiştir. Parçaların delik olmayan ucu açıkta kalacak şekilde polyester ile kaplanmıştır, elektrotların yüzeyi mekanik parlaticıda uygun zımpara kağıtlarıyla (100-1200 grid) parlatıldıktan sonra 1:1 etil alkol: aseton karışımı ile temizlenmiştir. Elektrokimyasal ölçümler üç elektrot tekniğinden yararlanılarak, CHI 660 C model elektrokimyasal analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sistemde YÇ çalışma elektrotu, platin (Pt) karşı elektrot ve gümüş-gümüş klorür elektrot (Ag/AgCl, 3M KCl) referans elektrot olarak kullanılmıştır. Farklı derişimlerde (0;0,5;1;5 ve 10 mM) 4-DB içeren 0,1 M HCl çözeltilerinde tespit edilmiştir. YÇ elektrotlara farklı daldırma sürelerinde sabit E<sub>ocp</sub> değerlerinde 100 kHz-0.009 Hz frekans aralığında, 7 mV genlik uygulanarak ve elektrolit karıştırılmadan elektrokimyasal impedans spektroskopisi ölçümleriyle elde edilmiştir. YÇ elektrotun referans elektrota karşı açık devre potansiyeli ölçüldükten sonra, 1 mV/s tarama hızıyla anodik yöne 500 mV(Ag/AgCl) polarize

edilmiştir. Kuantum teorik hesaplamalar GaussView 4.1 ve Gaussian 09W programları ile gerçekleştirilmiştir. DFT yaklaşımıyla, 6-311++G (d,p) baz seti kullanılmıştır. Belirlenen değişkenler; E<sub>HOMO</sub> (en yüksek enerjili dolu moleküler orbital enerjisi), E<sub>LUMO</sub> (en düşük enerjili boş moleküler orbital enerjisi), ΔE (E<sub>LUMO</sub> - E<sub>HOMO</sub>), μ (dipol moment), mutlak elektronegatiflik (χ), mutlak sertlik (η) vb.'dir. 4,4'-Diaminobifenil'in (4-DB) yapısı Şekil 1'de verilmiştir.

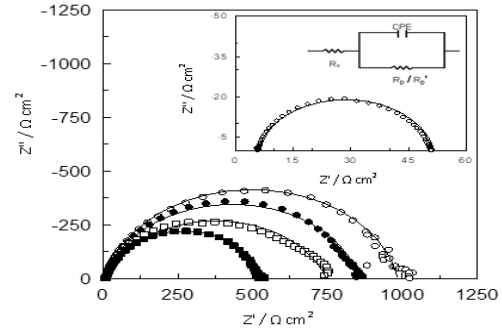


Şekil 1. 4,4'-Diaminobifenil'in molekül yapısı

## 3. Sonuçlar

### 3.1. Elektrokimyasal impedans spektroskopisi

Farklı konsantrasyonlarda 4-DB içeren ve içermeyen asidik çözeltilerde EIS yöntemiyle elde edilen Nyquist eğrileri Şekil 2'de verilmiştir. İmpedans parametreleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. 4-DB içeren ve içermeyen asidik ortamda elde edilen impedans eğrileri tam yarım daire şeklinde değil yarım elips şeklinde olmuştur.



Şekil 2. YÇ elektrotların 4-DB içermeyen (o) (büyütülerek verilmiştir) ve farklı derişimlerde 0,5 (◆), 1,0 (∇), 5,0 (●) ve 10 (□) mM 4-DB içeren 0,5 M HCl çözeltilerinde 1 saat bekleme süresi sonunda elde edilen Nyquist eğrileri (- fit çizgisi) ve eşdeğer devre modeli

Nyquist eğrilerinden 0.0;1;0.5;1;5 ve 10 mM 4,4'-Diaminobifenil (4-DB) içeren 0,1 M HCl çözeltilerinde belirlenen direnç değerleri

sırasıyla, 45; 520; 739; 846 ve 973 ohm'dur (Şekil 2).

Metal-asit çözeltisi ara yüzeyinde oluşan elektriksel eşdeğer devre Şekil 2 de gösterilmiştir. Burada  $R_s$  çözelti direncini,  $R_p$  polarizasyon direncini ( $R_p = R_{ct} + R_d + R_a + R_f$ ),  $R_a$  birikinti direncini,  $R_f$  film direncini,  $R_d$  difüz tabaka direncini,  $R_{ct}$  yük transfer direncini ve  $n$  değeri ise faz kaymasını göstermektedir. Burada uygun bir fit yapabilmek için CPE sabit faz elementi olarak kullanılmıştır [9].

Eğriler Şekil 2'de verilen eşdeğer devreye uygun olarak modellenmiştir ve belirlenen eşdeğer devre elemanları Tablo 1'de sunulmaktadır. Eğrilerin basık eliptik şekli sebebiyle modelleme CPE'ye uygun olarak yapılmıştır.  $\eta\%$  değeri inhibisyon etkinliği olup eşitlik (2) yardımıyla hesaplanmıştır.

**Tablo 1.** Elektrokimyasal impedans ölçümlerinden elde edilen veriler

Cinh (mM)	EIS			
	$R_p(\Omega \text{ cm}^2)$	CPE( $\mu\text{F cm}^2$ )	$n$	$\eta(\%)$
0,0	45	460	0,90	
0,5	520	121	0,87	91,3
1,0	739	115	0,82	93,9
5,0	846	97	0,87	94,6
10	973	63	0,89	95,3

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y_0(j\omega)^n} \quad (1)$$

$$\eta\% = \left( \frac{R'_p - R_p}{R'_p} \right) \times 100 \quad (2)$$

Eşitliklerde (1)-(2),  $Y_0$  ve  $n$ , frekanstan bağımsız parametreler olup,  $-1 \leq n \leq 1$  dir.  $\omega$  impedansın imajinal bölümünün açısız frekansıdır.

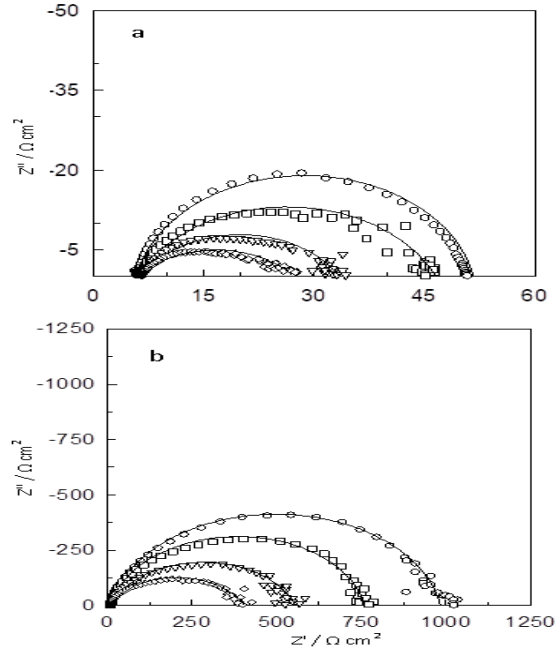
Tablo 1'de görüldüğü 1 saat bekleme süresinin sonunda elde edilen elektrokimyasal impedans spektroskopisi ölçüm sonuçlarına göre; artan 4-DB derişimi ile direnç değerleri artmış ve CPE değerleri azalmıştır. En yüksek inhibisyon etkinliği 10 mM 4-DB içeren ortamda %95,3 olarak belirlenmiştir.

### 3.2. Zamanla değişen inhibitör etkinliği

Şekil 3'de YÇ elektrokimyasal davranışını belirlemek için; inhibitörsüz ( $R_p$ ) ve inhibitörlü ( $R_p'$ ) ortamlarda 1, 24, 72 ve 120 saat bekleme

süreleri sonunda EIS ile ölçümler yapılmış ve değerlendirilmiştir.

Şekil 3'de her iki Nyquist eğrisinde de yüksek frekans bölgesinde başlayarak orta frekans bölgesinde devam eden ve düşük frekans bölgesinde kapanan yarı eliptik eğriler görülmektedir. Eğriler Şekil 2'de yer alan eşdeğer devreye göre modellenmiştir.



**Şekil 3.** YÇ elektrotların 4-DB içermeyen (a) 10 mM 4-DB içeren (b) 0,1 M HCl çözeltilerinde farklı daldırma sürelerinde 1h (○), 24 h (□), 72 h (Δ) ve 120 h (◇) elde edilen Nyquist eğrileri (-fit çizgisi)

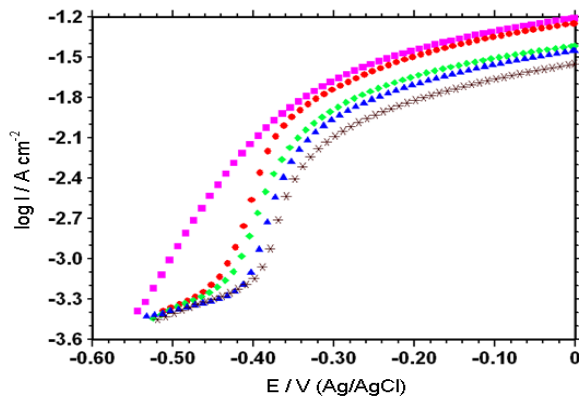
Şekil 3'de görüldüğü gibi artan bekleme süresi ile 4-DB içermeyen ve içeren ortamlarda direnç değerleri azalmıştır. Bu durum korozif ortamla uzun süre temas eden metalin çözünmesinden ve metal çözelti ara yüzeyine iç Helmholtz tabakaya kadar spesifik adsorplanabilen  $\text{Cl}^-$  iyonlarının aşındırıcı etkisinden kaynaklanabilir [9]. YÇ'nin direnç değerlerinin 4-DB içeren ( $R_p'$ ) inhibitör içermeyen ortama ( $R_p$ ) kıyasla çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Eşitlik 2 yardımıyla belirlenen inhibisyon etkinliğinin zamanla değişimi Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** 1-120 saat daldırma süreleri sonunda elektrokimyasal impedans spektroskopisi ölçümlerinden belirlenen inhibisyon etkinlikleri

t(h)	Çıplak 4-DB		$\eta(\%)$
	EIS	EIS	
	$R_p(\Omega \text{ cm}^2)$	$R_p(\Omega \text{ cm}^2)$	
1	45	973	95,3
24	39	755	94,8
72	25	547	95,4
120	20	400	95

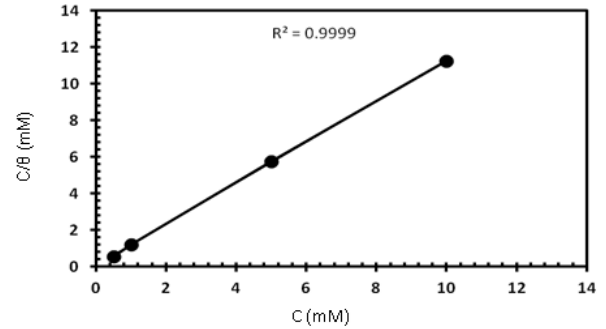
### 3.3. Potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

YÇ'in farklı derişimlerde 4-DB içermeyen ve içeren 0,1 M HCl'de 1 saat bekleme süresi sonunda elde edilen polarizasyon eğrileri Şekil 4' de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi 0,1 M HCl içerisine inhibitör eklenmesiyle birlikte akım yoğunluğu azalmaktadır. Akım yoğunluğundaki düşüş ve -0,50 V ile -0,40 V arasındaki bölgede akımın fazla değişmediği pasif bölgenin görülmesi ilave edilen inhibitör derişimi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Korozyon hızı ile orantılı olan akım yoğunluğundaki azalma organik molekülün metal yüzeyinde koruyucu bir film oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Yüzeyde oluşan bu film anodik bölgedeki metalin çözünme reaksiyonunu yavaşlattığını göstermektedir.

**Şekil 4.** YÇ'nin 0,1 M HCl çözeltide (■) ve 4-DB içeren 0,5 (●), 1,0 (◆), 5,0 (▲) and 10,0 mM (\*) 0,1M HCl'de 1 saat bekleme süresi sonunda elde edilen polarizasyon eğrileri

### 3.4. Adsorpsiyon izotermi

İnhibitör ve YÇ yüzeyi arasındaki ilişkiyi belirlemek için adsorpsiyon izotermi kullanılır. Sık kullanılan adsorpsiyon izotermi Langmuir, Temkin ve Frumkin izotermidir. İnhibitör moleküllerinin metal yüzeyine adsorpsiyon mekanizmasını aydınlatmak için EIS ölçümlerinden her bir derişim için yüzey kaplanma kesirleri belirlenmiştir. Organik yapılar çözelti-metal ara yüzeyine adsorplanarak, YÇ nin korozyon direncini değiştirirler. Organik maddelerin adsorpsiyonu, YÇ yüküne ve doğasına, yapıdaki yük dağılımına, çözeltinin adsorpsiyonuna ve ortamın ara yüzeyindeki elektrokimyasal potansiyele göre değişir [9-13]. C'ye karşı grafiğe geçirilen  $C/\theta$  değişiminin doğrusal olması ( $R^2$  yaklaşık 1 olması) 4-DB'nin 0,1 M HCl çözeltisinde YÇ yüzeyine adsorpsiyonunun Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğunu göstermiştir (Şekil 5) [10].

**Şekil 5.** YÇ'nin farklı derişimlerde 4-DB içeren 0,1 M HCl çözeltisinde elde edilen Langmuir adsorpsiyon izotermi

$$\frac{C_{inh}}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C_{inh} \quad (3)$$

Eşitlik 3'de  $C_{inh}$  inhibitör derişimini,  $\theta$  yüzey kaplanma kesrini,  $K_{ads}$  ise adsorpsiyon denge sabitini temsil etmektedir [10-13]. Şekil 5'da, Eşitlik 3 yardımıyla belirlenen  $K_{ads}$  değeri  $1,32 \times 10^4 \text{ M}^{-1}$  dir. Bu değer büyüklüğü 4-DB'nin YÇ yüzeyine oldukça güçlü adsorlandığını göstermektedir. Eşitlik 4 yardımıyla belirlenen  $\Delta G^o_{ads}$  değeri ise yaklaşık  $-33,47 \text{ kJ mol}^{-1}$  olarak hesaplanmıştır ve bu değer adsorpsiyonun fiziksel olarak gerçekleştiğini göstermektedir [14-20].

$$\Delta G_{ads}^0 = -RT \ln(55.5 K_{ads}) \quad (4)$$

### 3.5. Sıfır yük potansiyelinin (PZC) belirlenmesi

Organik maddelerin metal ile hem kimyasal hemde fiziksel adsorpsiyonu vardır. YÇ yüzeyi ve çözeltideki inhibitör arasında elektrostatik etkileşim fiziksel adsorpsiyonla, yük paylaşımı veya inhibitörden YÇ ye yük transferi ise kimyasal adsorpsiyonla açıklanabilir. YÇ yüzey yükü çözelti/metal ara yüzeyinde oluşan elektrik alandan kaynaklanmaktadır ve açık devre potansiyelinin ( $E_{ocp}$ ) sıfır yük potansiyeline ( $E_{pzc}$ ) kıyaslanması ile belirlenebilir. Antropov bağlı korozyon potansiyeli olarak bilinen  $E_r$ ,  $E_r = E_{ocp} - E_{pzc}$  şeklinde hesaplanabilir. Eğer  $E_r$  negatif ise elektrot yüzeyi negatif yüklüdür ve katyonların adsorpsiyonu gerçekleşir.  $E_r$  pozitif ise anyonların adsorpsiyonu olur.

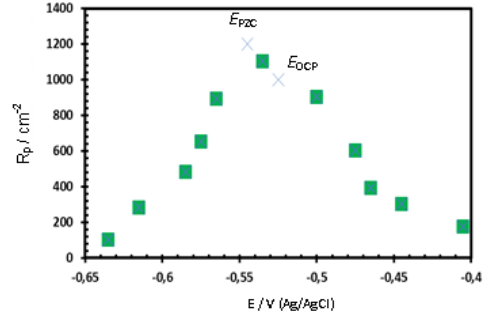
Bir çözücü içinde organik yapının adsorplanabilirliği YÇ nin sıfır yük potansiyeline bağlıdır. Korozif ortamda YÇ nin farklı yüklerde bulunabilmesi, organik yapıların seçici davranışlarında önemli bir etkidir.

$$E_r = E_{ocp} - E_{pzc} \quad (5)$$

$E_r$ : Antropov bağlı korozyon potansiyeli

Şekil 6 da 10 mM 4-DB içeren 0,1 M HCl çözeltisinden elde edilen  $R_p$ -potansiyel eğrisi görülmektedir. Elde edilen eğrinin maksimum noktası (minimum Cdl değeri,  $R_p = 1/2\pi f Cdl$ ) sıfır yük potansiyeline karşılık gelmektedir. Eğride de açık devre potansiyeli sıfır yük potansiyeline göre daha pozitif değerde kalmaktadır. Bu da YÇ nin pozitif yüklü olduğunu göstermektedir. 4-DB molekülleri ise ortamda moleküler halleri ile dengede protonlanmış halde bulunmaktadırlar [19].

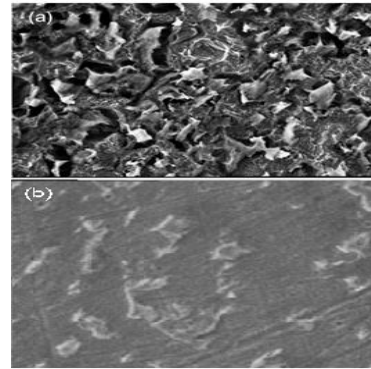
Şekil 6 da görüldüğü gibi 10 mM 4-DB içeren 0,1 M HCl çözeltiden elde edilen eğrinin maksimum olduğu nokta -0,545 V (vs. Ag/AgCl) dir. Bu noktaya sıfır yük potansiyelidir. Aynı koşullar altında açık devre potansiyeli ise -0,525 V (vs. Ag/AgCl) dir. ( $E_r = +0,020$  V (vs. Ag/AgCl)). Bu sonuç YÇ elektrotun yüzeyinin çalışılan koşullarda pozitif yüklü olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. YÇ elektrotun 10 mM 4-DB içeren çözeltide elde edilen potansiyel-polarizasyon direnci grafiği

### 3.6. SEM görüntüleri

İnhibitörsüz ve 10 mM 4-DB içeren 0,1 M HCl çözeltilerinde, 298 K'de 120 saat süreyle bekletilmiş olan elektrotların yüzey morfolojilerini belirlemek için ayrıntılı yüzey analizi, SEM görüntüleri alınarak Şekil 7 verilmiştir. Asidik ortamda bekletilmiş elektrot yüzeylerinde korozyona bağlı olarak girintili-çukurluklu, çukurcukların olduğu gözlenmiştir. Korozif ortama inhibitör eklendikçe yüzeylerin daha düz bir görünüm oluşturduğu, çukurcukların sayıca azaldığı izlenmiştir. En yüksek derişimdeki (10 mM 4-DB) elektrot yüzeyinin en pürüzsüz yapıya sahip olduğu net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 7. YÇ nin 0,1 M HCl çözeltisi içerisinde 120 saat sonunda inhibitörsüz (a) ve 10 mM 4-DB (b) inhibitör ortamında SEM görüntüleri

### 3.7. Kuantum teorik hesaplamalar

YÇ yüzeyinde adsorpsiyonunun açıklanabilmesi için kuantum teorik hesaplamalar yapılmıştır. Bu amaçla DFT

yaklaşımıyla, 6-311++G (d,p) baz seti kullanılmıştır. 4-DB molekülünün en düşük enerjili boş orbital (LUMO) enerjisi -0,019 eV; en yüksek enerjili dolu orbital (HOMO) enerjisi -0,189 eV olarak hesaplanmıştır. Bu orbitaller Şekil 8'de görülmektedir. 4-DB için belirlenen dipol moment değeri ise 0,6121 D'dir. Ayrıca 4-DB'nin  $\Delta E$  (LUMO-HOMO), mutlak elektronegatiflik ( $\chi$ ), mutlak sertlik ( $\eta$ ) değerleri de aşağıdaki formüllere göre belirlenmiştir. [19-21];

$$A = -E_{LUMO} \quad (6)$$

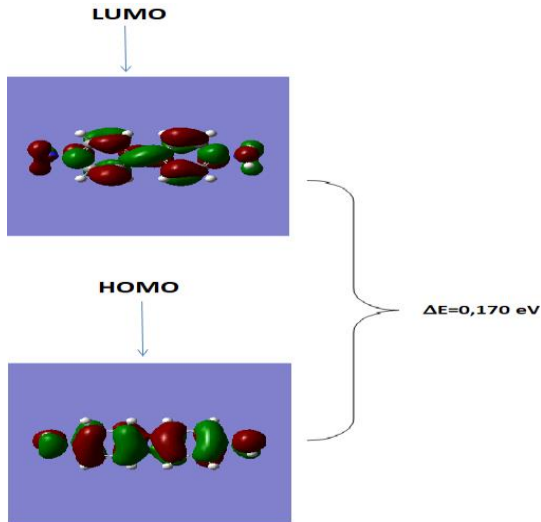
$$I = -E_{HOMO} \quad (7)$$

$$\chi = \frac{I + A}{2} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{I - A}{2} \quad (9)$$

Elde edilen sonuçlara göre;  $\Delta E$  değeri 0,170 eV iken, mutlak elektronegatiflik ( $\chi$ ) 0,104 ve mutlak sertlik ( $\eta$ ) 0,085 olarak hesaplanmıştır. Buna göre 4-DB'nin YÇ yüzeyine adsorpsiyonunun kolay bir şekilde gerçekleşebileceği düşünülmektedir.

4-DB moleküllerinin, asidik ortamda pozitif yükü yüklenmiş olan YÇ yüzeyine, negatif uçlardan yaklaşacağı düşünülmektedir.



Şekil 8. 4-DB'nin LUMO ve HOMO şekilleri

Sonuç olarak YÇ elektrodun 0,1 M HCl çözeltisindeki korozyonuna farklı derişimlerdeki 4-DB'nin inhibisyon etkisi incelenmiş ve inhibitör derişimi arttıkça inhibisyon etkinliği

değerlerinin de arttığı gözlenmiştir. 4-DB ve YÇ yüzeyi arasındaki ilişkiyi belirlemek için adsorpsiyon izotermelerinden yararlanılmış ve 4-DB'nin metal yüzeyine Langmuir adsorpsiyon izotermine göre tutunduğu bulunmuştur. YÇ/çözelti ara yüzeyinde oluşan elektriksel alandan YÇ'nin etkilenmiş olduğu ve bu ölçümlere göre; elektrodun yüzeyinin negatif yüklü ve 4-DB moleküllerinin metal yüzeyine elektrostatik etkileşimle doğrudan tutunduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Tablo 2'de görüldüğü gibi 4-DB YÇ'nin 0,1 M HCl çözeltisinde korozyon davranışına uzun daldırma süreleri boyunca (120 saat) iyi inhibisyon etkisi göstermiştir. Teorik hesaplamalar 4-DB'nin YÇ yüzeyine amin ucundan adsorplanabileceğini göstermiştir.

#### 4. Teşekkür

Bu çalışmaya maddi desteği sağlayan Mardin Artuklu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine (MAÜ-BAP-16-SYO-06) ve Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine (BAP-FYD-2015-4822) teşekkür ederiz.

#### 5. Kaynaklar

1. Yan, Y., Li, W., Cai, L. and Hou, B. (2008). Electrochemical and quantum chemical study of purines as corrosion inhibitors for mild steel in 1 M HCl solution. *Electrochim. Acta*, **53**: 5953–5960.
2. Bentiss, F., Traisnel, M., Lagrenée, M. (2000) The substituted 1,3,4-oxadiazoles: a new class of corrosion inhibitors of mild steel in acidic media, *Corros. Sci.* **42**:127–146.
3. Solmaz, R., Kardaş, G., Çulha, M., Yazıcı, B., Erbil, M. (2008) Investigation of adsorption and inhibitive effect of 2-mercaptothiazoline on corrosion of mild steel in hydrochloric acid media, *Electrochim. Acta*, **53**: 5941–5952.
4. Stanly, K. Jacob, G. Parameswaran, (2010) Corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid solution by Schiff base furoin thiosemicarbazone, *Corros.Sci.* **52**: 224–228.
5. Behpour, M., Ghoreishi, S.M., Mohammadi, N., Soltani, N., Salavati-Niasari, M. (2010) Investigation of some Schiff base compounds containing disulfide bond as HCl corrosion inhibitors for mild steel, *Corros. Sci.* **52**: 4046–4057.



6. Kumar, M.S., Kumar, S.L.A., Sreekanth, A., (2012) Anticorrosion potential of 4-amino-3-methyl-1,2,4-triazole-5-thione derivatives (SAMTT and DBAMTT) on mild steel in hydrochloric acid solution, *Ind. Eng. Chem. Re*, **51**: 5408–5418.
7. Xu, F., Duan, J., Zhang, S., Hou, B. (2008) The inhibition of mild steel corrosion in 1 M hydrochloric acid solutions by triazole derivative, *Mater. Lett*, **62**: 4072–4074.
8. Kumar, S.H., Karthikeyan, S. (2013) Torsemide and furosemide as green inhibitors for the corrosion of mild steel in hydrochloric acid medium, *Ind. Eng. Chem. Res*, **52**: 7457–7469.
9. Solmaz, R. (2010) Investigation of the inhibition effect of 5-((E)-4-phenylbuta-1,3-dienylideneamino)-1,3,4-thiadiazole-2-thiol Schiff base on mild steel corrosion in hydrochloric acid, *Corros Sci*, **52**: 3321–3330.
10. Scendo, M., Trela J. (2013) Adenine as an Effective Corrosion Inhibitor for Stainless Steel in Chloride Solution”. *International Journal of Electrochemical Science*, **8**: 9201–9221.
11. Deng, S., Li, X., Xie, X. (2014). Hydroxymethyl urea and 1,3-bis(hydroxymethyl) urea as corrosion inhibitors for steel in HCl solution”. *Corrosion Science*, **80**: 276–289.
12. Khamis, A., Saleh, MM., Awad, MI., El-Anadouti BE. (2013). Enhancing the inhibition action of cationic surfactant with sodium halides for mild steel in 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Corrosion Science*, **74**: 83–91.
13. Li, X., Deng, S, Fu, H, Xie, X, (2014). Synergistic inhibition effects of bamboo leaf extract/major components and iodide ion on the corrosion of steel in H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> solution, *Corrosion Science*, **78**: 29–42.
14. A. Popova, M., Christov, Vasilev, A. (2007) Inhibitive properties of quaternary ammonium bromides of N-containing heterocycles on acid mild steel corrosion. Part I: Gravimetric and voltammetric results, *Corros. Sci*, **49**: 3276–3289.
15. Ramya, K., Mohan, R., Anupama, K.K., Joseph, A. (2015) Electrochemical and theoretical studies on the synergistic interaction and corrosion inhibition of alkylbenzimidazoles and thiosemicarbazide pair on mild steel in hydrochloric acid, *Mater. Chem. Phys*, **150**: 632–647.
16. Yüce, A., Telli, E., Doğru Mert, B., Kardaş, G., Yazıcı, B. (2016). Experimental and quantum chemical studies on corrosion inhibition effect of 5,5 diphenyl 2-thiohydantoin on mild steel in HCl solution. *Journal of Molecular Liquid*, **218**: 384–392.
17. Yıldız, R., Doğan, T., Dehri, İ. (2014). Evaluation of Corrosion Inhibition of Mild Steel in 0.1 M HCl by 4-Amino-3-Hydroxynaphthalene-1-Sulphonic Acid, *Corrosion Science*, **85**: 215–221.
18. Yıldız, R., Döner, A., Doğan, T., Dehri, İ. (2014). Experimental studies of 2-pyridinecarbonitrile as corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution. *Corrosion Science*, **82**: 125–132.
19. Yıldız, R. (2015). An electrochemical and theoretical evaluation of 4,6-diamino-2-pyrimidinethiol as a corrosion inhibitor for mild steel in HCl solutions, *Corrosion Science*, **90**: 544–553.
20. Martinez S. (2002). Inhibitory mechanism of mimosa tannin using molecular, *Mater Chem. Physic*, **77**: 97–102.
21. Obot, I.B., Macdonald, D.D., Gasem, Z.M. (2008) Density functional theory (DFT) as a powerful tool for designing new organic corrosion inhibitors. Part 1: An overview, *Corros. Sci*, **50**: 865–871.
22. El Adnani, Z., Mcharfi, M., Sfaira, M., Benzakour, M., Benjelloun, A.T., EbnTouhami, M. (2013) DFT theoretical study of 7-R-3methylquinoxalin-2(1H)-thiones (R=H; CH<sub>3</sub>; Cl) as corrosion inhibitors in hydrochloric acid *Corros. Sci*, **68**: 223–228.



## Üleksitin H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Çözeltilisinde Çözünmesi Üzerine Ultrasesin Etkisi

Melike SINIRKAYA

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Erzurum  
melikesinirkaya@gmail.com

(Geliş/Received: 22.07.2017; Kabul/Accepted: 07.05.2018)

### Özet

Üleksit, borik asit üretiminde kullanılan en önemli minerallerden biridir. Borik asit, heterojen katı-sıvı reaksiyonlarında yan ürün olan jipsin kristallenmesine sebep olan, sülfürik asitin üleksitle reaksiyonundan elde edilir. Bu çalışmada H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltilerinde, ultrasesin üleksitin çözünmesi üzerine etkisi incelendi. Reaksiyon süresi ve sıcaklık parametere olarak seçildi. Ultrasesli ortamda, reaksiyon sıcaklığı arttıkça B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün çözünme oranı azaldı. Yine ultrasesli ortamda, reaksiyon ilerledikçe, CaO'ün dönüşüm oranı 30°C ve 50°C' de arttı. Ancak bu oran 70°C' de azaldı. Oysa, ultrasessiz ortamda B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CaO'ün çözünme fraksiyonları sıcaklık arttıkça arttı.

**Anahtar kelimeler:** Ultrases, Üleksit, Çözünme, Kavitasyon

### Effect of Ultrasound on The Dissolution of Ulexite in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Solution

#### Abstract

Ulexite is one of the most important minerals used in the production of boric acid. Boric acid is obtained from the reaction of sulfuric acid with ulexide, which causes crystallization of the by-product gypsum in heterogeneous solid-liquid reactions. In this study, the influence of ultrasound on the dissolution of ulexite in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions was investigated. The reaction time and temperature were chosen as parameters. In the presence of ultrasound, as the reaction temperature increased, the dissolved fraction of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was decreased. Also, in the presence of ultrasound, the conversion fraction of CaO increased at 30°C and 50°C as the reaction proceed, but this ratio decreased at 70°C. However, in the absence of ultrasound, the dissolved fractions of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CaO increased with increasing reaction temperature.

**Keywords:** Ultrasound, Ulexite, Dissolution, Cavitation

### 1.Giriş

Türkiye'nin yaklaşık %60'ın üzerinde dünyanın en büyük rezervine sahip olduğu bor bileşikleri, hemen hemen bütün endüstriyel sektörlerde farklı şekillerde kullanılmaktadır. Türkiye'nin ticari olarak geri kazanılabilir rezervlerinin arasında, kolemanit, üleksit ve tinkal yer almaktadır. Bunların arasında üleksit (Na<sub>2</sub>O.2CaO.5B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.16H<sub>2</sub>O), borik asit üretmek için ticari olarak en çok kullanılan minerallerden biridir. Türkiye'de üleksit, Balıkesir-Bigadiç ve Kütahya-Emet bölgelerinde mevcuttur [1].

Literatürde üleksitle ilgili pek çok çalışma görülebilir. Endüstriyel olarak borik asit, sülfürik asit kullanarak üleksitten elde edilir. Örneğin bir çalışmada üleksitin H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> ve HCl

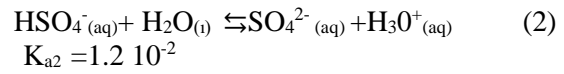
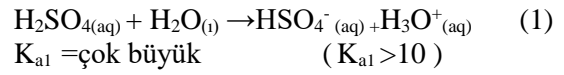
çözeltilerindeki çözünürlüğü incelendi. Bu çözeltilerde çözünme prosesleri difüzyon kontrollü olarak bulunurken, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltilerinin en düşük, HNO<sub>3</sub> çözeltilerinin ise en yüksek çözme oranına sahip olduğu görüldü. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile yapılan deneylerde, difüzyon sürecinin CaSO<sub>4</sub> ve CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O'ün oluşumundan negatif olarak etkilendiği ileri sürülmüş ancak bu olay ispat edilememiştir [2]. Borik asit, Türkiye'de heterojen katı-sıvı reaksiyonlarında sülfürik asitin kolemanitle olan reaksiyonundan jipsin kristallenmesine yol açarak üretilir. Yüksek çözünürlüğe sahip olan borik asit, reaksiyon boyunca sıvı fazda kalırken (ağırlıkça % 18 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>), jips yan ürün olarak elde edilir ve

reaktör içine çöker. Birçok endüstriyel kimyasalın üretiminde, ürünün kristalleşmesine yol açan katı-sıvı reaksiyonları büyük önem taşımaktadır.

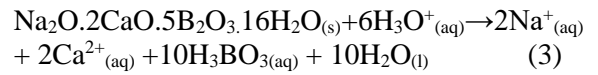
Literatürde, ürünlerin kristalleşmesine yol açan heterojen katı-sıvı reaksiyonlarının çeşitli örnekleri gösterilmiştir. Örneğin bir çalışmada Hagenon ve arkadaşları, faz transfer katalizörünün ve ultrasesin bir model reaksiyonu üzerine nispi etkilerini incelediler. Okur ve arkadaşları ise, ultrasesli ve ultrasessiz ortamlarda kolemanitin H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltilerinde çözünme kinetiğini çalıştılar. Bir başka çalışmada Betchtloff ve arkadaşları, ürünlerin kristalleşmesine yol açan heterojen katı-sıvı reaksiyonlarından kalsiyum sitratın sülfürik asitle olan reaksiyonunu incelediler [3–5].

Ultrases uygulamasının kristallenme süreci üzerine önemli etkileri olduğu görülmüştür. Ultrases, heterojen sistemlerde kütle transferi ve reaksiyon oranlarını artırabilir, çünkü ultrases, süspansiyondaki katı-sıvı arayüzeydeki difüzyon katmanı kalınlığında azalmaya neden olur [3,4,6-8]. Katı/sıvı ve sıvı sistemlerde ultrases ile üretilen etkilerin çoğu, kavitasyonun meydana gelmesiyle ilişkilidir. Heterojen katı-sıvı sistemlerde arayüzey, sonik alanda kavitasyon kabarcıklarının asimetric bir şekilde çökmesine neden olan bir oyuklanma meydana getirir. Sonuçta arayüzeyde, rezonans kavitasyon büyüklüğünden bir kaç kez daha genişletilmiş yaklaşık 100 m.s<sup>-1</sup> olarak tahmin edilen hızda katı yüzeyle çarpışan kavitasyondan geçen bir mikro jet sıvısı oluşur. Bu olay, ultrasonik çukur açma ve yüzey temizleme için kullanılan bir erezyon etkisi meydana getirir [9]. Ultrasesin kristallenme üzerine etkisi, çekirdeklenme üzerine olan etkisi kadar çarpıcı görülmemekte, ve büyük oranda genişletilmiş hacim fazlı kütle transferinden ortaya çıkmaktadır. Hem kavitasyon hem de ultrasonik akış ile oluşturulan mekanik bozulmalar akışkan dinamiklerini değiştirir ve çözünen maddenin genişleyen kristal yüzeye hacimsel kütle transferini artırır. Bununla birlikte kristal yüzeyindeki yüzey çekirdeklenme ve birleşme etkileri, her bir yüzeydeki büyüme oranını ve dolayısıyla

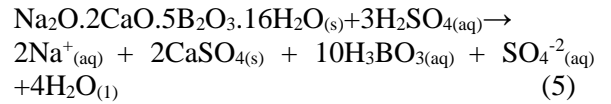
kristalin büyümesini belirlemektedir [10]. Konuyla ilgili yapılan bazı teoriksel çalışmalardan, Hickling [11], Hunt ve Jackson [12], gerekli termodinamik koşulların potansiyel kaynağı olarak çökmekte olan tek bir küresel kabarcığın davranışına odaklandılar. Özellikle, kabarcık çöküşü olarak meydana gelen yüksek basınç, buzun çekirdeklenme uyarısı olarak ileri sürülmüş [11,13], ancak bu evrensel olarak kabul görmemiştir [12,14]. Bu çalışmanın amacı ise, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solüsyonunda üleksitin çözünmesi üzerine ultrases enerjinin etkisini incelemektir. Çözünme poseslerinde kullanılan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sıvı ortamda aşağıdaki reaksiyonları vermektedir.



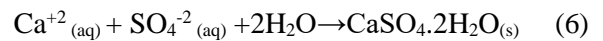
Yukarıdaki denklemlerde,  $K_{a1}$  değerinin çok büyük olması H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'in H ve HSO<sub>4</sub>'e büyük oranda ayrıştığını ve K değeri büyüdükçe asitin daha fazla kuvvetlendiğini göstermektedir. Üleksit çözeltiliye ilave edildiği zaman 3 numaralı denklemde görülen reaksiyon meydana gelir.

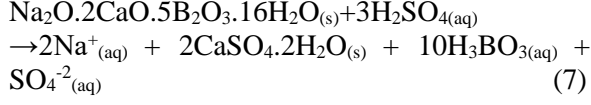


H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> asit konsantrasyonunun artmasıyla çözünme oranı artmış, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> konsantrasyonunun artmasıyla çözünme oranı azalmıştır. CaSO<sub>4</sub>'in oluşması 5. denklemde gösterilen reaksiyonu meydana getirirken, CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O'in oluşumu ise, reaksiyonu 7. denklemde gösterildiği gibi etkiler.



veya

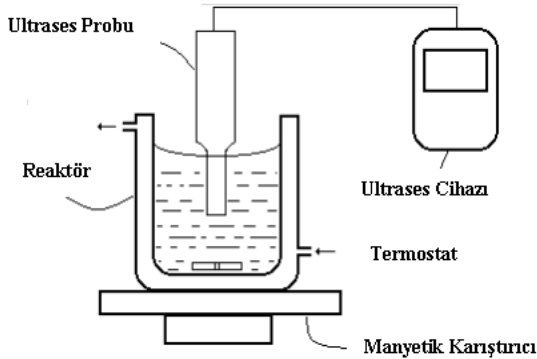




elde edilir.

## 2. Materyal ve Metot

Çalışmada kullanılan üleksit cevheri, Balıkesirin Bigadiç bölgesinden elde edilmiştir. Cevher önce kırılmış ve öğütülmüş daha sonra ASTM standart eleklerle 710–1000 µm, 500–710 µm, 355–500 µm, 250–355 µm, fraksiyonlarına ayrılmıştır. Çalışmalarda 500- 710 µm'lik boyuttaki reaktör atığı kullanılmıştır. Elde edilen tüm numuneler elektrikli bir fırında 105 °C'de kurutulduktan sonra kapalı bir desikatörlerde saklandılar. Yapılan kimyasal analizlerde, numunenin % 28.55 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % 21.11 CaCO<sub>3</sub>, % 40 As ve % 10.34 çözünmeyen madde içerdiği (% 10'u SiO<sub>2</sub>) tespit edildi. Cevherdeki % CO<sub>2</sub> miktarı önceden tartılan yaklaşık 1 g ağırlığındaki cevherin TGA da 1 h 550°C de ve 2 h 950°C de bekletilip desikatörde soğutulmasından sonra ağırlık azalmaları arasındaki farktan gravimetrik olarak hesaplanmıştır. Cevherin B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ihtivası mannitol indikatörü kullanarak 0.1 N'lik KOH çözeltisi ile, As miktarı puffer tableti ile 0.1 N'lik EDTA ile CaO miktarı ise mürkesit indikatörü ile 0.1 N'lik EDTA ile titrasyon yaparak volumetrik olarak hesaplanmıştır [15]. SiO<sub>2</sub> miktarı ise cevherin 900°C'de fırında kalsine edilmesiyle gravimetrik olarak tayin edilmiştir [16].



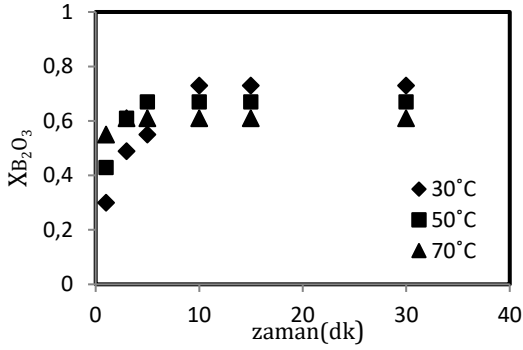
Şekil 1. Çözünme işleminin yapıldığı deney düzeneği

Deney düzeneği, Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. Düzenek, uç yarıçapı 1 cm olan bir prob ve bir termokupl ile donatılmış çözünme kabı ile birlikte ultrasonik jeneratörden meydana gelir.(Tip Cole Parmer,Ultrasonik homojenleştirici, 400 W, 20 kHz). Çözünme hızı üzerine, sıcaklığın etkisini incelemek için deneyler 30°C, 50°C ve 70°C de 0.1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> konsantrasyonda 800 rpm' lik karıştırma hızında 500-710 µm'lik partikül boyutuyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda, 500 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanılmış ve önceden tespit edilen sıcaklığa geldikten sonra, katı üleksit reaktöre ilave edilmiş ve reaksiyon başlamıştır. Reaksiyon süreleri sonunda 3 ml'lik numuneler, önceden belirlenmiş zaman aralıklarıyla reaktörden çekilip, hemen süzülerek süzüntüde volumetrik yöntemle B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CaO analizleri yapılmıştır.

## 3. Bulgular

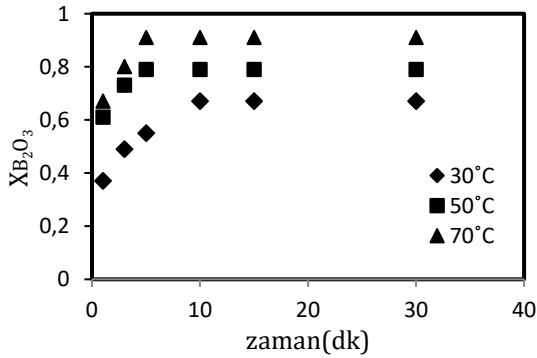
Deneyler, ultrasesin etkisini daha açık bir şekilde incelemek için hem ultrasesli (16.4 W) hem de ultrasesiz ortamlarda yapılmıştır. Tüm deneylerde, partiküllerin çökmesini önlemek amacıyla manyetik bir karıştırıcı ile 800 devir dak<sup>-1</sup>'lik bir karıştırma hızı kullanılmıştır.

Ultrases kullanılan deneylerde sıcaklık arttıkça, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün çözünme fraksiyonu azalmaktadır ( Şekil 2). Bunun nedeninin sıcaklık arttıkça kristallenme hızının artmasına ve oluşan CaSO<sub>4</sub>'ün çözünürlüğünün azalmasına bağlanmaktadır. Literatürde, ürünlerin kristalleşmesine yol açan heterojen katı-sıvı reaksiyonların çeşitli örnekleri tartışılmıştır. Bu çalışmalarda, reaktanın yüzeyine çöken ürünün reaktanın yüzeyini kaplamasıyla reaksiyon oranının düşmesine sebep olduğu, böylece verim kaybına yol açtığı tespit edilmiştir [3–5].

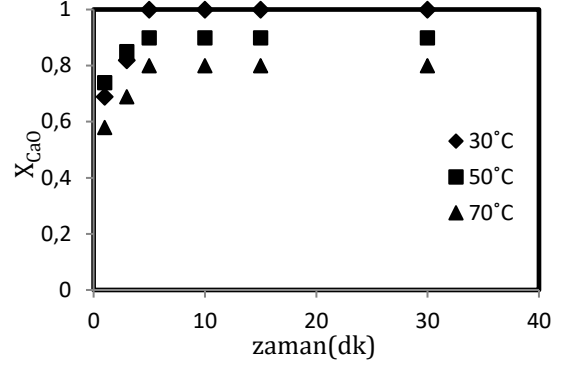


Şekil 2. Ultrasesli ortamda 0,1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>' de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'in çözünmesi üzerine reaksiyon sıcaklığının etkisi

Oysa, Şekil 3'de görüldüğü gibi ultrases yokluğunda çözünen B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı, incelenen değerler aralığında artan sıcaklıkla doğru orantılı olarak artmıştır. Şekil 4'den elde edilen sonuçlar, başlangıçta yüksek sıcaklıklarla CaO'in dönüşüm fraksiyonlarında düzensizlik olmasına rağmen, zamanın ilerlemesiyle 70°C'de en az dönüşümlerin elde edildiğini göstermektedir. Şekil 5' den elde edilen sonuçlar ise ultrasesiz ortamda CaO'in dönüşüm oranının sıcaklık arttıkça arttığını göstermektedir. Örneğin, bu oran 30 °C'de 30 dakikalık bir reaksiyon süresinden sonra % 74 olurken, 70 °C'de % 84,5'e ulaşmıştır.



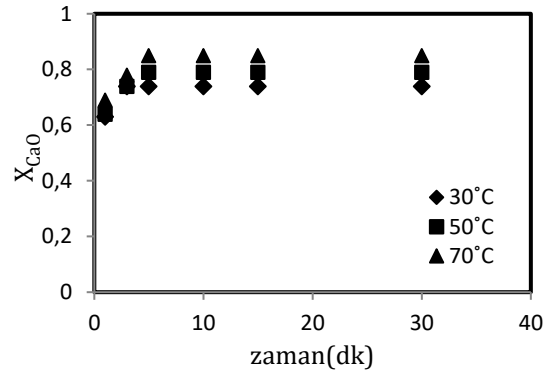
Şekil 3. Ultrasesiz ortamda 0,1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>' de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'in çözünmesi üzerine reaksiyon sıcaklığının etkisi



Şekil 4. Ultrasesli ortamda 0,1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>' de CaO'in çözünmesi üzerine reaksiyon sıcaklığının etkisi

#### 4. Sonuçlar

Üleksidin, sülfürik asit ortamında çözünmesi ultasesli ve ultrasesiz ortamlarda paralel olarak incelenmiştir. Deneylede, reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon süresi parametre olarak seçilmiş ve ultrasesli ortamda reaksiyon sıcaklığındaki artışla B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün çözünme fraksiyonunun azaldığı gözlenmiştir. Sonuçlar ultrasesli ortamda sıcaklık azaldıkça liç işleminin, cevherdeki CaO' in 30°C' de % 100' ünü çözdüğünü gösteriyor. Ultrasesin kullanıldığı deneylerde, yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta yerel sıcak nokta oluşumuyla meydana gelen CaSO<sub>4</sub>'ın, partiküllerin etrafında film direnci meydana getirmesinden dolayı, cevherdeki B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'in çözünme fraksiyonu azalmıştır.



Şekil 5. Ultrasesiz ortamda 0,1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>' de CaO'in çözünmesi üzerine reaksiyon sıcaklığının etkisi

Ultrasesti ortamda sıcaklık arttıkça başlangıç sürelerinde CaO'in dönüşüm oranında bir karmaşa olmasına rağmen, bu oran 5. dakikadan itibaren sıcaklığın artmasıyla azalmış ve 70°C' de en düşük dönüşümler elde edilmiştir. Ultrasessiz ortamda ise sıcaklığın azalmasıyla çözeltiliye geçen CaO miktarı azalmıştır. Kristallenme meydana gelmediğinden veya daha az meydana geldiğinden dolayı ana çözeltiliye geçen B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı sıcaklığın artmasıyla doğru orantılı olarak artmıştır. Ultrases, kristallenme üzerine mekanik etkilere sahiptir. Ultrases sıvı bir ortama uygulandığında, gücü yalnızca kütle transferi için bir itici güç olmakla kalmaz, aynı zamanda kavitasyon olarak bilinen önemli bir olayı da başlatır. Ses dalgalarının negatif basınç periyodu esnasında, kavitasyon kabarcıkları oluşur. Bir kavitasyon kabarcığı parçalandığında, güçlü bir şok dalgasının serbest kalmasıyla yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta yerel bir sıcak nokta meydana gelir. Normalde bir kavitasyon kabarcığının çökme süreci oluşma süresine kıyasla çok kısadır. Ultrases ve kavitasyon olayının gücü, kristallenme olayı esnasında birincil çekirdeklenmeye sebebiyet verir [9]. Çalışmamızda, çözünme işlemi esnasında borik asit elde etmenin yanı sıra solüsyonda CaSO<sub>4</sub> kristalleri de elde edildi. Kristaller, ultrasesin kullanıldığı deneylerde daha net bir şekilde görüldü. Sonuç olarak, ultrasessiz ortamda B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün geri kazanılması ve çözeltiliye geçmesi ultrasesti ortama nazaran daha ekonomiktir. Ancak ultrasesti ortamlarda B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün geri kazanılmasına ilave olarak kristal oluşumu da gözlenecektir.

Buradan elde edilen kristaller, kimyasal, eczacılık ve petrokimya endüstrileri de dahil olmak üzere birçok endüstriyel alanda kullanılabilir. Örneğin uçucu kül, fosfojips, kireç çamuru, kırmızı çamur ve borojips gibi üretilebilen çeşitli endüstriyel atıkların kullanılması, çevreyi dejenerasyondan kurtarmak için önemlidirler [17,18].

Ayrıca, borojipsin çimentonun sertleşmesini %10 geciktirmek için ayarlayıcı madde olarak kullanılması tavsiye edilir. Bu nedenle, çok çeşitli endüstriyel jipsler, [19] çimento üretiminde klinkere eklenebilir. Diğer atık

alçılardan daha iyi özelliklere sahip bir çimento da elde edilebilir.

## 5. Kaynaklar

1. Gezer, B., Sert, H., Okyay, T.O., Bozkurt, S., Başkaya, G., Şahin, B., Ulutürk, C. and Sen, F. (2017). Reduced graphene oxide (rGO) as highly effective material for the ultrasound assisted boric acid extraction from ulexite ore. *Chemical Engineering Research and Design*, **117**: 542-548.
2. Imamutdinova, V.M. (1967). Kinetics of dissolution of borates in mineral acid solutions. *Zh. Prikl. Khim*, **40**: 2593-2596.
3. Hagenon, L.C., Naik, S.D and L.K. and Doraiswamy, L.K. (1994). Rate enhancements in a solid-liquid reaction using PTC, microphase, ultrasound and combinations thereof. *Chem. Eng. Sci.*, **49**:4787-4800.
4. Okur, H., Tekin, T., Ozer, A.K. and Bayramoglu, M. (2002). Effect of ultrasound on the dissolution of colemanite in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Hydrometallurgy*, **67**: 79-86.
5. Betchtloff, B., Justen, P.J. and Ulrich, J. (2001). The Kinetics of Heterogeneous Solid-Liquid Reaction Crystallizations—An Overview and Examples. *Chem. Ing. Tech*, **73**: 453-460.
6. Lyczko, N., Hassoun, M., Espitalier, F., Louisnard, O. and David, R. (2002). Crystallization of Potassium Sulphate Assisted by Ultrasound. *Chem. Eng. Trans.*, **1**: 209-214.
7. Teipel, U., Mikonsaari, I. and Ulrich, J. (2002). Ultrasonic Crystallization of Potassium Alum. *Chem. Eng. Trans.*, **1**: 239-243.
8. Hagenon, L.H. and Doraiswamy, L.K. (2000). The rate enhancing effect of ultrasound by inducing supersaturation in a solid-liquid system. *Chem. Eng. Sci.*, **55**: 3085-3090.
9. Cains, P.W., Martin, P.D. and Price, C.J. (1998). The Use of Ultrasound in Industrial Chemical Synthesis and Crystallization 1. *Applications to Synthetic Chemistry, Organic Process Research and Development*, **2(1)**: 34-48.
10. Luque de Castro, M.D and Priego-Capote, F. (2007). Ultrasound-assisted crystallization (sonocrystallization). *Ultrasonics Sonochemistry*, **14**: 717-724.
11. Hickling, R. (1965). Nucleation of freezing by cavity collapse and its relation to cavitation damage. *Nature*, **206**: 915-917.
12. Hunt, J.D and Jackson, K.A. (1996). Nucleation of solid in an undercooled liquid by cavitation. *J. Appl. Phys.*, **37**: 254-257.

13. Hickling, R. (1994). Transient, high pressure solidification associated with cavitation in water. *Phys. Rev. Lett.*, **73**: 2853–2856.
14. Hunt, J.D and Jackson, K.A. (1966). Nucleation of the solid phase by cavitation in an undercooled liquid which expands on freezing. *Nature*, **211**:1080–1081.
15. Gülensoy, H. (1984). Kompleksometrinin Esasları ve Kompleksometrik Titrasyonlar, İstanbul Üniversitesi Yayınları, İstanbul, Türkiye. 144-146.
16. Furman, N.H. (1963). "Standart Methods of Chemical Analysis". D. Van. Nostrand Company, 6th ed, New Jersey, A.B.D, 798-865.
17. Singh, M. and Garg, M. (1999). Cementitious binder from fly ash and other industrial wastes. *Cem. Concr. Res.*, **29**: 309– 314.
18. Tosunoglu, V., Demirbag, R., Boncukcuoglu, R., Anapalı, Ö. and Öztepe, C. (2002). Pozzolanic properties of natural pisa. *Energy Educ. Sci. Technol.*, **8 (2)**: 77– 84.
19. Ozkul, H.M. (2000). Utilization of citri- and desulphogypsum as set retarders in Portland cement. *Cem. Concr. Res.*, **30**: 1755– 1758.



## **Cu/NiCoBi Elektrotun Hidrojen Gazı Eldesinde Katot Olarak Kullanımı ve Katalitik Etkisinin Zamanla Değişiminin Belirlenmesi**

**Mehmet Erman Mert<sup>1</sup>, Başak Doğru Mert<sup>1,2\*</sup>**

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü., 01330, Adana, Türkiye

<sup>2</sup>Mardin Artuklu Üniversitesi, Sağlık Yüksekokulu, Hemşirelik Bölümü, 47100, Mardin, Türkiye  
bdogrumert@artuklu.edu.tr

**(Geliş/Received: 23.08.2017; Kabul/Accepted: 07.05.2018)**

### **Özet**

Bu çalışmada bakır (Cu) yüzeyinde elektrokimyasal yöntemle nikel-kobalt-bizmut (NiCoBi) üçlü kaplama oluşturulmuş (Cu/NiCoBi) ve alkali suyun elektrolizi ile hidrojen gazı eldesindeki performansı incelenmiştir. Bu amaçla; hidrojen aşırı gerilimleri, hidrojen gazı hacimleri, katodik polarizasyon ölçümleri ve farklı aşırı gerilimlerde elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri elde edilmiştir. Elektrotların elektrokatalitik etkilerinin zamanla değişiminin belirlenmesi için elektroliz hücresine 168 saat boyunca 100 mA cm<sup>-2</sup> sabit akım yoğunluğu uygulanmıştır ve farklı zaman aralıklarında elektrokimyasal ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre; Cu/NiCoBi elektrotun hidrojen aşırı gerilimi, Cu ve diğer ikili kaplamalardan (Cu/NiCo, Cu/NiBi) oldukça düşüktür. Cu/NiCoBi elektrot 168 saatlik elektroliz süresi boyunca etkinliğini korumuştur.

**Anahtar kelimeler:** Hidrojen; Elektrokataliz; NiCoBi Kaplama

## **The Application of Cu/NiCoBi Electrode as a Cathode for Hydrogen Production and Determination of Catalytic Effect During Long Term Period**

### **Abstract**

In this study nickel-cobalt-bismuth (NiCoBi) ternary coating formed on copper (Cu) by electrochemical method and application of Cu/NiCoBi for alkaline water electrolysis was investigated. For this purpose, hydrogen over potentials, hydrogen gas volume, cathodic polarization curves and electrochemical impedance spectra which were achieved different over potentials, were obtained. In order to determine electrode's electro-catalytic effect and time behavior 100 mA cm<sup>-2</sup> current density was applied to electrolysis cell, during 168h. Results showed that hydrogen over potential value of Cu/NiCoBi is lower than Cu and other binary coatings (Cu/NiCo, Cu/NiBi). Cu/NiCoBi provided catalytic efficiency during 168h electrolysis period.

**Keywords:** Hydrogen; Electrocatalysis; NiCoBi Coating

### **1. Giriş**

Enerji insanoğlunun var olabilmesi için süreklilik arz eden bir ihtiyaçtır. Dünya genelinde hızla artan nüfus, beraberinde enerjiye olan gereksinimleri de arttırmıştır. Teknolojik gelişmeler ile sanayi ilişkisinin de katkısı ile enerji üretimi, iletimi, tüketimi ve bunun sonucu çevreye olan etkileri son derece önemli hale gelmiştir. Bugün tüm dünya genelinde ortak kanı enerji ihtiyaçlarının “yenilenebilir kaynaklar üzerinde giderimi” nin gerekliliğidir [1-4]. Bu

kaynaklar arasında yer alan hidrojen enerjisi ise beraberinde pek çok avantaj sağlamaktadır [5-6]. Hidrojen doğal bir yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanarak değişik hammaddelerden (su, hava, kömür ve doğal gaz gibi) üretilen sentetik bir yakıttır [7-8]. Hidrojen gazı eldesinde pek çok yöntem bulunmasına rağmen elektroliz yöntemi ön plana çıkmaktadır [9]. Bu yöntemde aşırı gerilimi düşük elektrotların kullanımı maliyeti azaltacağı için bunların üretimi ve zamanla değişen performans değerlendirmesi gerekmektedir. Bu amaçla

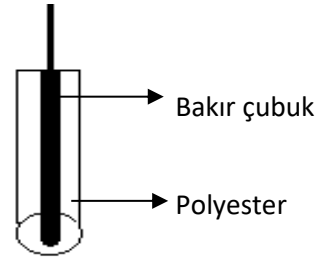
NiCoZn içeren kaplamaların elektrot olarak kullanıldığı çalışmalarda aşırı gerilimi düşük bir takım elektrotların elde edildiği görülmektedir [10]. Solmaz ve ark. [10], gerçekleştirdiği çalışmada, NiCoZn kaplı bakır elektrot elektrot yüzeyinden bir miktar Zn uzaklaştırılmıştır. Modifiye edilen elektrot 1 M KOH çözeltisinde 24 saat süresince elektroliz işlemine tabi tutularak polarize edildikten sonra -100 mV'da uygulanan elektrokimyasal impedans ölçümü sonunda direncin yaklaşık olarak 14 ohm olduğu tespit edilmiştir. Lupi ve ark. [11], çalışmalarında farklı kimyasal bileşime sahip Ni-Co alaşımları kullanmıştır. Bu alaşımın katot olarak kullanıldığı alkali elektroliz banyosuna sodyum molibdat ilavesi yaparak hidrojen oluşum gazı verimliliğini arttırmışlardır. % 5 Co ihtiva eden alaşım için elde edilen sonuçlara göre; 4 g/ L molibden iyonu içeren elektroliz çözeltisinde 30 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 246 mV aşırı gerilim değeri tespit edilmiştir. Bu değer aynı koşullarda % 77,9 Co içeren alaşım için 296 mV'dur. Elde edilen bulgulara göre Ni-Co alaşımının saf Ni'ye kıyasla hidrojen gazı verimliliğinin fazla olduğunu, fakat % Co oranı arttıkça elektrotların aşırı gerilimlerinin arttığını göstermektedir [11]. Buna göre; Ni-Co içeren kaplamaların Ni oranının Co oranına kıyasla yüksek olmasında fayda olabilir. Mert ve Kardaş [12], bakır elektrot yüzeyinde galvanostatik yöntem ile farklı kimyasal kompozisyonlarda Ni-Bi kaplamalar oluşturmuştur. Ni<sup>+2</sup>:Bi<sup>+3</sup> banyo mol oranı 99,71:0,29 olan çözeltide elde edilen kaplamanın alkali ortamda hidrojen gazı oluşumunu Ni kaplamaya kıyasla yaklaşık olarak 2,7 kat arttırdığını belirlemişlerdir. -1,4 V'da elde edilen elektrokimyasal impedans ölçümlerine göre direncin yaklaşık 6,5 kat azaldığı tespit edilmiştir. Ni-Co, Ni-Bi içeren ikili kaplamaların bu denli yüksek performans göstermesinden dolayı ve literatürde daha önceden bakır yüzeyinde oluşturulan NiCoBi üçlü kaplamaya ait çalışma ve/veya çalışmalara rastlanmamasından dolayı, bu çalışmada Ni-Co-Bi üçlü kaplamanın oluşturulması planlanmıştır. Fakat kaplamadaki Co ve Bi mol oranlarının miktarları literatür göz önüne alınarak, Ni mol oranına kıyasla düşük tutulmak istenmiştir.

Literatür incelendiğinde Ni içeren çoklu kaplamaların alkali suyun elektrolizi vasıtasıyla hidrojen gazı üretimi için etkin olduğu

gözlenmiştir fakat endüstriyel uygulamalarda kullanım için halen uygun (aşırı gerilimi düşük, etkinliği yüksek) katot arayışı devam etmektedir. Mevcut çalışmanın literatürde doldurmak istediği boşluk ise aşırı gerilimi düşük ve uzun süre kararlılığını koruyan elektrot üretimini Pt, Ir vb pahalı metal ve/veya kaplamalar yerine daha düşük maliyetler ile üretilen Ni-Co-Bi ile gerçekleştirmektir. Kısaca bu çalışmanın amacı, alkali ortamda elektroliz ile hidrojen gazı eldesinde kullanılmak üzere, aşırı gerilimi düşük, katalitik etkinliği yüksek, uzun süre performansını kararlı olarak koruyabilen bir elektrotun (Cu/NiCoBi) oluşturulması ve katot olarak kullanımınıdır.

## 2. Materyal ve Metot

Deneyisel çalışmalarda kullanılan Cu elektrotların hazırlanması için 0,6 cm çapında, silindirik şeklindeki Cu çubuktan 5'er cm boyutunda parçalar kesilmiştir. Kesilen parçaların alt yüzeylerinden bir tanesine delik açılarak bu deliğe Cu tel yerleştirilmiştir. Parçaların delik olmayan ucu açıkta kalacak şekilde polyester ile kaplanmıştır (Şekil 1), elektrotların yüzeyi mekanik parlaticıda uygun zımpara kağıtlarıyla (en son 1200 grid olacak şekilde) parlatıldıktan sonra 1:1 etil alkol: aseton karışımı ile temizlenmiştir.



Şekil 1. Bakır elektrotun şematik gösterimi

Tüm kaplamalar galvanostatik yöntemle Ivium stat marka (seri no: A06063) elektrokimyasal analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir. 50 mA cm<sup>-2</sup> akım yoğunluğu ve 10 µm kaplama kalınlığı uygulanmıştır. Kaplama banyolarının kimyasal bileşimi; nikel kaplama banyosu: 0,1 M NiSO<sub>4</sub>.6H<sub>2</sub>O + 0,04 M NiCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O + 0,02 M H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (pH: 5,6-6,2) ; kobalt kaplama banyosu: 0,1 M CoSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O +

0,008 M  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  + 0,02 M  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (pH: 2,5-3,0); bizmut kaplama banyosu: 1 M  $\text{HNO}_3$  + 0,1 M  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  + 0,1 M  $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$  (pH: 1,7-2,0) şeklindedir. İkili kaplamalarda metal tuzlarının banyodaki mol oranları en uygun koşullara göre belirlenmiştir [10,12]. NiCoBi üçlü kaplama, kaplama banyosunda farklı derişimlerde  $[\text{Ni}^{2+}]$ ,  $[\text{Co}^{2+}]$ ,  $[\text{Bi}^{3+}]$  iyonlarını içerecek şekilde uygun hacimlerde karıştırılarak hazırlanmıştır.  $[\text{Ni}^{2+}]$ :  $[\text{Co}^{2+}]$ :  $[\text{Bi}^{3+}]$  oranı 49,75 : 49,75 : 0,5 şeklindedir. Hidrojen aşırı gerilimleri ( $\eta_{\text{H}_2}$ ) deneysel olarak belirlenen ayrışma gerilimleri vasıtasıyla hesaplanmıştır. Bu amaçla iki elektrot tekniğinden yararlanılmıştır. 1  $\text{cm}^2$  yüzey alanına sahip platin (Pt) levha karşı elektrot olarak kullanılmıştır. Diğer elektrokimyasal ölçümler üç elektrot tekniği ile CHI elektrokimyasal analiz cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Referans elektrot olarak Ag/AgCl (3 M KCl) kullanılmıştır. Elektrolit olarak 1 M KOH kullanılmıştır.

### 3. Sonuçlar

Suyun 25°C’de tersinir ayrışma gerilimi ( $E_{\text{tr}}$ ) 1,23 V’tur. Elektroliz sisteminde Pt anot olarak kullanılmıştır. Platin üzerinde oksijen aşırı gerilimi ise 0,47 V’tur. Teorik olarak katotta hidrojen ve anotta oksijen çıkışının gerçekleşebilmesi için sisteme 1,7 V potansiyel uygulanmalıdır [13]. Fakat sistemdeki aşırı gerilimler sebebi ile çok daha yüksek potansiyel uygulanması gerekmektedir. Cu, Cu/Ni, Cu/NiCo, Cu/NiBi ve Cu/NiCoBi çalışma elektrotlarının katot olduğu durumda sistemlerin ayrışma gerilimleri ( $E_{\text{d.a.g.}}$ ), ( $\eta_{\text{H}_2}$ ) ve elektrotların 3 V sabit potansiyelde 30 dakika elektrolizi sonucunda belirlenen hidrojen gazı hacimleri ( $V_{\text{H}_2} / \text{mL cm}^{-2}$ ) Tablo 1’de verilmiştir. Katotta oluşan hidrojen gazının hacmini ölçmek için, katot üzerine içerisine 1 M KOH çözeltisi koyulmuş bir büret ters çevrilerek yerleştirilir ve büret içerisinde hidrojen gazı ile birlikte su buharı da olduğundan saf hidrojen hacmini belirlemek için basınç düzeltilmesi yapılır.

$$P_{\text{T}} = P_{\text{H}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}} \quad (1)$$

$$V_{\text{H}_2} = (P_{\text{H}_2} / P_{\text{H}_2\text{O}}) \times V_{\text{ölçülen}} \quad (2)$$

**Tablo 1.** Çalışma elektrotları için belirlenen ayrışma gerilimi, hidrojen aşırı gerilimi ve hidrojen hacmi değerleri

Katot	$E_{\text{d.a.g.}} / \text{V}$	$\eta_{\text{H}_2} / \text{V}$	$V_{\text{H}_2} / \text{mL cm}^{-2}$
Cu	2,46	0,76	8,43
Cu/Ni	2,16	0,46	11,52
Cu/NiCo	2,02	0,32	18,61
Cu/NiBi	2,07	0,37	15,33
Cu/NiCoBi	1,92	0,22	20,51

Tablo 1’de en düşük hidrojen aşırı gerilimi ve en yüksek hidrojen gazı hacmi NiCoBi üçlü kaplama için elde edilmiştir. Bu elektrotların değişik aşırı gerilimlerde katodik akım potansiyel eğrilerinden belirlenen akım yoğunlukları ( $I / \text{mA cm}^{-2}$ ) Tablo 2’de verilmiştir.

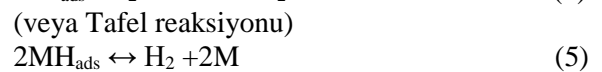
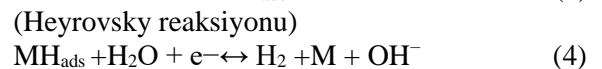
**Tablo 2.** Çalışma elektrotları için farklı aşırı gerilimlerde belirlenen akım yoğunluğu değerleri

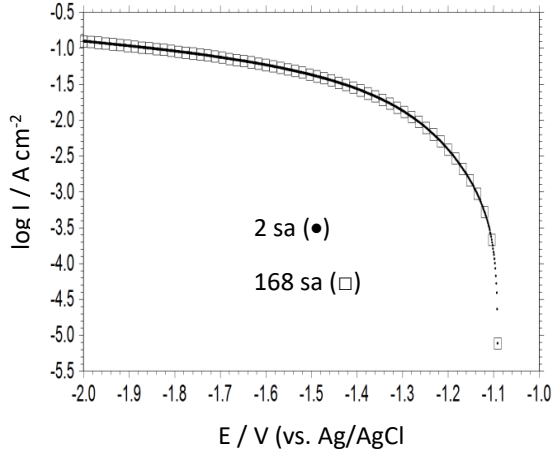
Katot	$I / \text{mA cm}^{-2}$		
	-0,100 V	-0,200 V	-0,300 V
Cu	0,07	0,33	2,71
Cu/Ni	0,15	1,69	13,93
Cu/NiCo	0,94	6,69	29,21
Cu/NiBi	0,83	5,75	28,72
Cu/NiCoBi	7,67	51,08	89,21

Tablo 2’de en yüksek akım yoğunluğu değerleri NiCoBi üçlü kaplama için elde edilmiştir. Cu/NiCoBi’nin zamanla değişen elektrokatalitik etkisinin belirlenmesi için elektroliz sistemine sabit akım yoğunluğu (100  $\text{mA cm}^{-2}$ ) 168 saat boyunca uygulanmıştır ve farklı zaman aralıklarında elde edilen katodik polarizasyon eğrileri Şekil 2’de sunulmuştur.

Şekil 2’de görüldüğü gibi 2-168 saat elektroliz işlemleri sonunda Cu/NiCoBi kararlılığını korumuştur. Her iki sistemde de akım yoğunluğu değerlerinin stabil olduğu görülmektedir. Şekil 2’de belirlenen Tafel eğimi yaklaşık 98  $\text{mV/dec}$  ‘dir.

Alkali ortamda hidrojen gazı çıkış reaksiyonunun mekanizması aşağıdaki şekilde verilebilir [14].





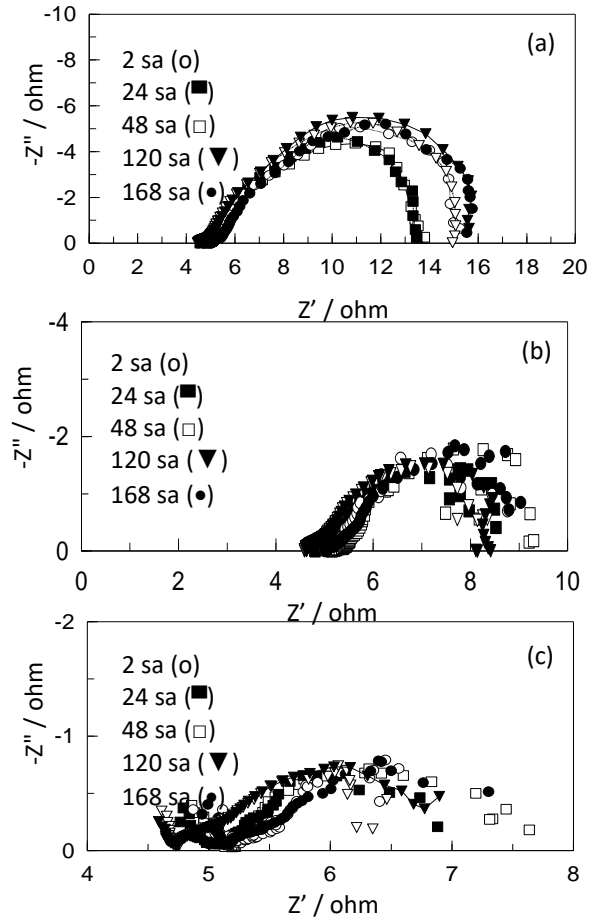
**Şekil 2.** Cu/NiCoBi'nin farklı sürelerde elektrolizi sonrasında elde edilen katodik polarizasyon eğrileri.

Burada, M-H<sub>2</sub>O ve M-H<sub>ads</sub> etkileşimlerinin kuvveti reaksiyon mekanizması ve hızında önemli bir rol oynamaktadır. Hem Volmer-Heyrovsky hem de Volmer-Tafel reaksiyonu mekanizmaları M-H<sub>ads</sub> oluşumunu ve ardından ayrışmayı gerektirir. M ile H<sub>2</sub>O etkileşiminin ise suyun ayrışarak, hidrojen çıkışını kolaylaştıracak kadar güçlü olması gerekir. Bununla birlikte, bu etki bir sonraki basamakları daha yavaş hale getirebilir. M-H etkileşimi hidrojen gazının desorpsiyonunu engelleyecek kadar güçlü olmamalıdır. Önerilen mekanizmalarda görüldüğü gibi adsorplanan hidrojen (H<sub>ads</sub>) ile metal arasındaki bağ enerjisi oldukça önemlidir. Bazı metallerin üzerinde hidrojen gazı üretimi sırasında gerçekleşen yük değişimi akım yoğunlukları, M-H bağ enerjisine karşı grafiğe geçirilirse volkan eğrisi olarak adlandırılan eğri elde edilir. M-H bağ enerjisi arttıkça yük değişimi akım yoğunluğu, önce artmakta sonra azalmaktadır. Buna göre en yüksek yük değişimi akım yoğunluğu gösteren metaller Pt, Au, Ir, Rh gibi metallerdir. Bu metallerin elektrokatalitik özelliklerinin de yüksek olduğu bilinir. Fermi enerjisi ve diğer parametrelerden elde edilen korelasyonlar sonucunda; geçiş metallerinin alaşımlarında yüksek katalitik etki görülmektedir. Hidrojen elektrotu olarak birkaç geçiş metal alaşımı belirlenmiştir. Bunların arasında nikel ve nikel temelli alaşımlar yüksek bir katalitik etkiye sahiptir. Nikelin, kobalt ve bizmut metalleri gibi

metaller ile birlikte kullanıldığı kaplamalarda hidrojen gazı üretiminin ve etkinliğinin daha yüksek olacağı düşünülmektedir.

Cu/NiCoBi için 2-168 saat boyunca farklı aşırı gerilimlerde elde edilen elektrokimyasal impedans spektroskopisi ölçümleri Şekil 3'de sunulmaktadır.

Şekil 3'de görüldüğü gibi artan katodik aşırı gerilim ile saptanan direnç değerleri azalma yönünde değişim göstermektedir ve elde edilen Nyquist eğrileri katodik polarizasyon eğrileri ile uyum içerisinde. Buna göre; 2-168 saat elektroliz işlemleri sonunda Cu/NiCoBi kararlılığını korumuştur. Şekil 3'de, artan aşırı gerilimlerde, direnç değerlerinin azaldığı görülmektedir özellikle -0,200 V ve -0,300 V değerleri için düşük frekans bölgesindeki saçılmalar elektrot yüzeyinden çıkan hidrojen gazından kaynaklanabilir [12].



**Şekil 3.** Cu/NiCoBi'nin farklı sürelerde ve farklı aşırı gerilimlerde -0.100 V (a), -0.200 V (b) -0.300 V (c) elde edilen Nyquist eğrileri

#### 4. Tartışma

Sonuç olarak, NiCoBi üçlü kaplama Cu ve diğer ikili kaplamalara kıyasla alkali suyun elektrolizi ile hidrojen gazı eldesinde yüksek bir etkinlik göstermiştir. Cardona ve ark. [15]'a göre Ni ve Ni içeren kaplamaların (NiCo, NiCo-Zn), katot olarak kullanıldığı alkali elektroliz hücrelerinde  $-250 \text{ mA cm}^{-2}$  sabit akım yoğunluğunda en düşük yaklaşık aşırı gerilimi  $0,138 \text{ V}$  olarak belirlenmiştir.  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  elektrotun kullanıldığı alkali elektroliz hücresinde ise  $1,85 \text{ V}$ 'da belirlenen en yüksek akım yoğunluğu  $-125 \text{ mA cm}^{-2}$  'dir. Solmaz ve ark. [10]'a göre Cu/NiCo-Zn için  $-0,100 \text{ V}$ 'da elektrokimyasal impedans spektroskopisi ölçümlerinden belirlenen direnç değeri, 24 saat sonunda  $13,74 \text{ ohm}$  iken bu çalışmada ise Şekil 2'de  $-0,100 \text{ V}$ 'da Cu/NiCoBi'nin 24 saattlik elektroliz süresi sonunda direncinin  $9,25 \text{ ohm}$  olduğu görülmektedir. Daha düşük direnç daha yüksek katalitik etkinliği ifade etmektedir. NiCoBi üçlü kaplamanın diğer ikili kaplamalara kıyasla daha yüksek performans göstermesinin nedeni Ni, Co ve Bi arasındaki sinerjistik etki ile açıklanabilir [16].

#### 5. Teşekkür

Çukurova Üniversitesi ve Prof.Dr. Birgül YAZICI, Prof.Dr. Gülfeza KARDAŞ'a teşekkür ederiz.

#### 6. Kaynaklar

- Chanda, D., Hnat, J., Paidar, M., Schauer, J., and Bouzek, K. (2015). Synthesis and characterization of  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  electrocatalyst for the hydrogen evolution reaction in alkaline water electrolysis using different polymer binders. *Journal of Power Sources*, **285**: 217-226.
- Chen, Z., Ma, Z., Song, J., Wang, L., and Shao, G. (2016). Novel one-step synthesis of wool-ball-like Ni-carbon nanotubes composite cathodes with favorable electrocatalytic activity for hydrogen evolution reaction in alkaline solution. *Journal of Power Sources*, **34**: 86-96.
- Diaz, L.A., Hnat, J., Heredia, N., Bruno, M.M., Viva, F.A., Paidar, M., Corti, H.R., Bouzek, K. and Abuin, G.C. (2016). Alkali doped poly (2,5-benzimidazole) membrane for alkaline water electrolysis: Characterization and performance. *Journal of Power Sources*, **312**: 128-136.
- Solmaz, R., Döner, A., Doğrubaş, M., Erdoğan, İ.Y. and Kardaş, G. (2016). Enhancement of electrochemical activity of Raney type NiZn coatings by modifying with PtRu binary deposits: Application for alkaline water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, **41**: 1432-1440.
- Ma, Z., Li, R., Wang, M., Meng, H., Zhang, F., Bao, X.Q., Tang, B. and Wang, X. (2016). Self-supported porous Ni-Fe-P composite as an efficient electrocatalyst for hydrogen evolution reaction in both acidic and alkaline medium. *Electrochimica Acta*, **219**: 194-203.
- Müller, C.I., Sellschopp, K., Tegel, M., Rauscher, T., Kieback, B. and Röntzsch, L. (2016). The activity of nanocrystalline Fe-based alloys as electrode materials for the hydrogen evolution reaction. *Journal of Power Sources*, **304**: 196-206.
- Fiegenbaum, F., Souza, M.O., Becker, M.R., Martini, M.A. and Souza, R.F. (2015). Electrocatalytic activities of cathode electrodes for water electrolysis using tetra-alkyl-ammonium-sulfonic acid ionic liquid as electrolyte. *Journal of Power Sources*, **280**: 12-17.
- Tufa, R.A., Rugiero, E., Chanda, D., Hnat, J., Baak, W., Veerman, J., Fontananova, E., Profio, G.D., Drioli, E., Bouzek, K. and Curcio, E. (2016). Salinity gradient power reverse electrodialysis and alkaline polymer electrolyte water electrolysis for hydrogen production. *Journal of Membrane Science*, **514**: 155-164.
- Suermann, M., Schmidt, T.J. and Büchi, F.N. (2016). Cell Performance Determining Parameters in High Pressure Water Electrolysis. *Electrochimica Acta*, **211**: 989-987.
- Solmaz, R., Döner, A., Şahin, İ., Yüce, A.O., Kardaş, G., Yazıcı, B. and Erbil, M. (2009). The stability of NiCoZn electrocatalyst for hydrogen evolution activity in alkaline solution during long-term electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**: 7910-7918.
- Lupi, C., Dell'era, A., Pasquali, M. (2014). In situ activation with Mo of Ni-Co alloys for hydrogen evolution reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**: 1932-1940.
- Mert, M.E. and Kardaş, G. (2011). Electrocatalytic behaviour of NiBi coatings for hydrogen evolution reaction in alkaline medium. *Journal of Alloys and Compounds*, **509**: 9191-9194.
- Yazıcı, B., Tatlı, G., Galip, H., Erbil, M. (1995). Investigation of Suitable Cathodes for the Production of Hydrogen Gas by Electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, **20**: 957-965.

14. Bockris, J.O.M., Reddy, A.K.N. (1923). Modern electrochemistry. Kluwer Academic Plenum Publishers, 1670-1671.
15. Cardona, I.H., Ortega, E. and Herranz, V.P. (2011). Impedance study of hydrogen evolution on Ni/Zn and Ni-Co/Zn stainless steel based electrodeposits. *Electrochimica Acta*, **56**: 1308-1315.
16. Santos, D.M.F., Sequeira, C.A.C. and Figueiredo, J.L. (2013). Hydrogen production by alkaline water electrolysis. *Quimica Nova*, **36 (8)**: 1176-1193.

## **Geleneksel Kastamonu Evlerinin İnşasında Kullanılan El İle Üretilmiş Harman Tuğla İle Fabrikasyon Olarak Üretilen Tuğlanın Fiziksel, Mekanik Ve Yapısal Karakterizasyon Özelliklerinin Karşılaştırılması**

**Hakan ÇAĞLAR<sup>1\*</sup>, Arzu ÇAĞLAR<sup>2</sup>, Serra Zerrin KORKMAZ<sup>3</sup>, Bahar DEMİREL<sup>4</sup>, Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR<sup>5</sup>**

<sup>1\*</sup>Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Kastamonu, Türkiye,

<sup>2</sup>Kastamonu Üniversitesi, Abana Sabahat Mesut Yılmaz Meslek Yüksekokulu, Kastamonu, Türkiye,

<sup>3</sup>Selçuk Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Konya, Türkiye,

<sup>4</sup>Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye,

<sup>5</sup>Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Kastamonu, Türkiye  
hcaglar@kastamonu.edu.tr

**(Geliş/Received: 26.10.2017; Kabul/Accepted: 10.09.2018)**

### **Özet**

Bu çalışmada, Geleneksel Kastamonu Evleri'nde kullanılan geleneksel olarak elle üretilen mevcut harman tuğlaların fiziksel (özellikler, birim hacim ağırlık, kılcal su emme, porozite, donma-çözünme dayanıklılık ve aşınma), ısı (katı cisimlerin ısı iletim katsayısı tayini) ve mekanik (basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı) özellikleri incelenmiştir. Ayrıca harman tuğlaların yapısal karakterizasyonunun tespiti için SEM ve BET görüntüleri alınmıştır. Çalışmaya Kastamonu il merkezinde bulunan Geleneksel Kastamonu Evi'nden numune temini ile başlanılmıştır. Fiziksel ve mekanik deneyler önce mevcut numunelere, daha sonra fabrikasyon yöntemiyle üretilen numunelere uygulanmıştır. Deney işlemleri tamamlandıktan sonra, bulunan değerler karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilere göre mevcut numunenin özgül ağırlık, birim hacim ağırlık ve katı cisimlerde ısı iletim katsayısı tayini değerlerinin fabrikasyon numunesine göre daha üstün özellikte olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kılcal su emme donma-çözünme etkisi, porozite, aşınma ve basınç dayanımı değerlerine bakıldığında, fabrikasyon yöntemiyle üretilen harman tuğlalarının daha üstün nitelikte olduğu ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Geleneksel Kastamonu Evleri, harman tuğlası, fiziksel özellikler, mekanik özellikler.

## **Comparison Of The Physical And Mechanical Properties Of Manually Manufactured And Factory Production Blended Bricks Used In Build Of Traditional Kastamonu Houses**

### **Abstract**

In this study, the physical (specific gravity, weight per unit of volume, capillary water absorption, porosity, freezing-thawing durability and wear), thermal (heat conduction coefficient of solids) and mechanical (compressive strength and tensile splitting strength) properties of available blend bricks which are traditionally hand produced in Traditional Kastamonu Houses have been examined. Also SEM and BET images were taken to determine the structural characterization of the blend bricks. The study started with supply of samples from the Traditional Kastamonu House located in the city center of Kastamonu. Firstly physical and mechanical experiments were applied to the available samples, then to the samples produced by the fabrication method. After the test procedure was completed, the values found were compared. According to the obtained data, it was determined that the available sample has higher specific gravity, weight per unit of volume and heat transfer coefficient values of solid bodies than the fabricated sample. When the values of capillary water absorption, freeze-thaw effect, porosity, abrasion and compressive strength are taken into consideration, It has been revealed that the bricks produced by the fabrication method are superior to the bricks.

**Keywords:** Traditional Kastamonu Houses, blending bricks, physical properties, mechanical properties

## 1.Giriş

Gökırmak'ın bir kolu olan Karaçomak Deresi vadisinde kurulu bulunan, Tarihi kentler birliği üyesi Kastamonu, geleneksel konutları bağlamında Anadolu'nun en az incelenmiş kentlerinden biridir [1].

Tarihi kentlerin en önemli kimlik unsurlarından biri geleneksel konutlardır. Bu bağlamda geleneksel konutlar geçmişin günümüze ve yarınlara aktarılabilmesinde önemli rol oynayan fiziksel çevre elemanlarıdır [2]. Geleneksel konutlar bir yandan üretildikleri ortamın sosyo- kültürel, ekonomik, estetik vb. kültür öğelerinin, diğer yandan parsel kullanımı, plan çözümleri, işlevsel özellikleri, cephe kurgusu, yapı malzemesi, yapım tekniği vb. mimari öğelerin anlaşılmasına yönelik önemli bilgiler sunmaktadır [3]. Geleneksel dokuya sahip yerleşmelerin oluşum sürecindeki temel etkenler; iklim, arazi yapısı, yerel yapı malzemesi olanakları, ulaşım olanaklarıdır [4]. Geçmişten günümüze kent kimliklerinin şekillenmesinde mimari yapılar ve cepheleri önemli yer tutmaktadır [5].

Yapı alt sistemlerinden olan cepheler, mekânı şekillendirme, sınırlandırma, iç mekân ile dış mekânı birbirinden ayırma veya bağlama, iç mekânı dış ortam koşullarından koruyarak, kullanıcıların ihtiyaç duyduğu konfor şartlarını oluşturmaktadır [6]. Dış cephe; bina iç ortamını dış ortamdan ayıran, su, güneş, sıcaklık gibi etmenlere karşı koruyan dış kabuk olarak tanımlanır [7].

Geleneksel Kastamonu Evleri'nde uygulanan en yaygın dış cephe (dış duvar) oluşturma tekniği, ahşap çatki sisteminin boşluklarına çeşitli dolgu malzemeleri yerleştirilerek oluşturulan Hıms yapım sistemidir. Ormanlık ve nispeten bol yağışlı bir bölgenin ürünü olan Kastamonu Evleri yapı malzemesi olarak; ahşap, taş, harman tuğla ve kerpiçten oluşmuştur. Şekil 1' de ahşap çatki sisteminin boşlukları harman tuğla ile doldurulmuştur.

Çalışma kapsamında incelediğimiz harman tuğla; kil, killi toprak ve balçığın ayrı ayrı veya harman edilip gerektiğinde su, kum, öğütülmüş tuğla ve kiremit tozu ve benzerleri karıştırılarak el ile veya aletlerle şekillendirildikten sonra kurutulup genellikle harmanlarda pişirilmesi ile

elde edilen ve duvar yapımında kullanılan malzemedir [8].



Şekil 1: Geleneksel Kastamonu Evleri dış duvar dolgu malzemesi

Harman tuğlanın, kerpiçten ısıl işlemler görerak yapı malzemesine dönüşümü ilk olarak protohistorik (M.Ö. 2500-1750) toplumların zamanlarına dayanmaktadır [9]. Pişmiş harman tuğla binlerce yıldan beri özellikle betonarme bulunana kadar kullanılan yapı malzemesidir [10].

Eyüpgiller [2] çalışmasında Kastamonu'da yer alan tarihi konut yapılarının envanterini çıkararak yapıların korunmuşluk durumları, çevresel değerlilikleri, fiziksel yapısının gelişmesini ve yüzyıllar boyu nasıl bir kent olduğunu araştırmıştır. Kılınçarslan ve diğ. [11], Isparta ili Yalvaç ilçesinde bulunan tarihi Pisidia Antiocheia kentinde kullanılan tuğla ve bağlayıcı malzemelerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri araştırmış, benzer tarihi yapılar ile karşılaştırıldığında, Yalvaç Pisidia Antiocheia kentinde kullanılan tuğla ve bağlayıcı malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin üstün özelliklerde olduğu tespit edilmişlerdir. Sömer [12] geçmiş dönemlerde Anadolu'da Burdur ve Isparta illeri içerisinde yer alan Kremna, İncirlihan Kervansarayı, Adada, Sığırlık Harabesi, Zorzila ve Psidia Antiokya gibi ören yerlerinde kullanılmış taş, tuğla ve harç (bağlayıcı ve agrega) gibi yapı malzemelerinin deneysel çalışmalarını yapıp numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri gibi karakteristik özelliklerini ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada, Geleneksel Kastamonu Evlerinde dış duvar dolgu malzemesi olarak elle üretilen harman tuğlalar ile fabrika üretimi



tuğlaların fiziksel ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

Bu çalışmada materyal olarak, Şekil 2a'da verilen Geleneksel Kastamonu Evleri'nin dış duvarında duvar dolgu malzemesi olarak kullanılan yaklaşık 5x10x19 cm ebatlarında harman tuğla ve Şekil 2b 'de verilen piyasada bulunan fabrikasyon yöntemiyle üretilen 5x10x19 cm ebatlarında harman tuğla kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 2: a) Mevcut numune, b) Fabrika üretilen numune

### 2.2. Metot

Çalışmada Geleneksel Kastamonu Evleri'nden numune temini, fabrika yöntemiyle üretilen numune temini, numunelerin fiziksel farklılıklarının tespiti için özgül ağırlık, birim

hacim ağırlık, kılcal su emme, porozite, donma-çözünme etkisi, aşınma ısıl özelliğinin tespiti için katı cisimlerin ısı iletim katsayısı tayini deneylerinin yapılması, mekanik deneylerin (basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı) yapılması ve yapısal karakterizasyonun tespiti için SEM ve BET yöntemlerinin uygulanışı şeklinde bir metot izlenmiştir.

#### 2.2.1. Mevcut ve fabrika üretimi numunelere uygulanan fiziksel deneyler

**Özgül ağırlık deneyi;** Birimsiz olan özgül ağırlığı ölçmek için boşluklu cisim kuru halde öğütülerek ince toz haline getirilir, sonra 74 mikron göz açıklıklı elekten elenmiştir. Elekten geçen ince tozların bir kısmı tartılarak kütlelerin ağırlığı bulunur, sonra aynı kütle içinde sıvı bulunan bir dereceli kaba (piknometre) konarak hacmi ölçülür. Ağırlık bu şekilde bulunan hacme bölünerek özgül ağırlık hesaplanmıştır.

**Birim hacim ağırlık deneyi;** Fabrikasyon yöntemiyle üretilen numunelerin birim hacim ağırlıklarının belirlenmesi amacıyla numuneler, kap içerisinde 3 saat süreyle su içerisinde kaynatılmıştır. Ardından kap içerisinden alınarak, su içerisindeki asılı ağırlıkları ( $P_1$ ) ve suya doygun yüzey kuru ağırlıkları ( $P_2$ ) ölçüldükten sonra örnekler etüvde 24 saat süreyle kurutulmuştur ( $P_3$ ). Bulunan değerlere göre numunelerin birim hacim ağırlığı;

$$\text{“Birim Hacim Ağırlık (g/cm}^3\text{)} = P_3/P_2 - P_1\text{” [2.1]}$$

formülü kullanılarak hesaplanmıştır [13].

**Kılcal su emme (Kapilarite) deneyi;** Fabrikasyon yöntemiyle ve geleneksel olarak elle üretilen mevcut numunelerin önce kuru ağırlıkları tartılmıştır. Ardından taban yüzeyleri suyun yüzeyine degecek şekilde kaba yerleştirilmiştir. Numunelerin dört bir tarafı suya temas etmemesi için 1cm yükseklikte parafin ile kaplanmıştır. Belirli zamanlarda (60, 120 ve 180 dk.) yapılan ağırlık ölçümleri ile emilen su miktarı hesaplanmıştır [14].

**Porozite deneyi;** Porozite deneyinde numuneler 3 saat süreyle kaynatılarak bekletilmiştir. Kap içerisinden alınan numuneler, su içerisindeki asılı ağırlıkları ( $P_1$ ) ve suya doygun yüzey kuru ağırlıkları ( $P_2$ ) ölçülen örnekler etüvde 24 saat süreyle kurutulmuştur

(P3). Bulunan değerlere göre numunelerin porozite değerleri;

$$“Porozite (\%) = (P2-P3/P2-P1) \times 100” \quad [2.2]$$

formül kullanılarak hesaplanmıştır [13] [15].

**Donma-çözünme deneyi;** Numuneler 1 saat süresince suda bekletilmiş, daha sonra -20 °C iki saat donma işlemine tabi tutulmuş, son olarak bir saat çözülmeye bırakılmıştır. Bu döngü 20 kez tekrarlanarak donma-çözünme deneyi gerçekleştirilmiştir [16].

**Aşınma deneyi;** Numuneler aşındırma test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında partikül erozyona maruz bırakılarak uygulanmıştır. Numunelerin aşınma testleri 20-60 mesh elek aralığı tane boyutuna sahip granül kullanılarak yapılmıştır. Deneyde 0,45 MPa hava basıncı ile 5,5 mm delik çapına sahip püskürtücüden harman tuğlası yüzeyine 90° dik açıyla granül püskürtülerek yapılmıştır. Aşınma testi sonrası aşınma kayıpları;

$$“(A) = (m_1 - m_2) / B” \quad [2.3]$$

formüle göre hesaplanmıştır.  $m_1$  deneye başlamadan önceki ilk ağırlığı  $m_2$  deney sonrası ağırlığı, B ise hacim ağırlığını ifade etmektedir [17] [18].

**Katı cisimlerin ısı iletim katsayısı tayini deneyi;** Mevcut ve fabrikasyon yöntemiyle üretilen harman tuğlalarının ısı yalıtım özelliklerinin belirlenmesi için, ısı yalıtım özelliğinin en önemli ölçütü olan ısı iletkenlik katsayısı belirlenmiştir. Isı iletkenlik katsayısı belirlenirken, her bir numune üç farklı ısı ve nem koşulları altında teste tabi tutulmuştur. Her bir test en az 10 termal ölçümden oluşmuştur. Isı iletim katsayısı ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır [19].

### 2.2.2. Mevcut ve fabrika üretimi numunelere uygulanan mekanik deneyler

**Basınç Dayanımı;** Mekanik özelliklerden biri olan basınç mukavemeti deneyi TS EN 772-1’ e göre, Şekil 3’ de verilen bilgisayar kontrollü basınç presinde basınç dayanımı deneyi

yapılmıştır. Hem fabrikasyon yöntemiyle üretilen numunelerin (Şekil 3a) hem de mevcut numunelerin (Şekil 3b) basınç dayanımı değeri kırılma yükünün yüzey alanına bölünmesi sonucu hesaplanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3: Fabrika üretimi (a) ve mevcut numunelerin(b) basınç dayanım deneyi

**Yarmada Çekme Dayanımı;** Yarmada çekme dayanımı deneyi, Şekil 4’de görüldüğü gibi yatay olarak presin tablaları arasına yerleştirilen, numunelerin altına ve üstüne yerleştirilen plakalara dik yönde basınç yüklemesi uygulanarak gerçekleştirilmiştir [20]. Yarmada çekme dayanımı deneyi BESMAK marka cihazla yapılmıştır.



Şekil 4: Yarmada çekme dayanımı

### 3. Deneysel Bulgular ve Değerlendirme

#### 3.1. Mevcut ve fabrika üretimi numunelerin fiziksel deney sonuçları

Tablo 1’de geleneksel yöntemle üretilen mevcut ve fabrikasyon yöntemiyle üretilen harman tuğlalara ait donma-çözünmeden önce ve donma-çözünmeden sonraki basınç değerleri verilmiştir. M1-M6 olarak verilen değerler mevcut numuneleri, F1-F6 olarak verilen numuneler ise fabrikasyon üretimi olan numuneleri ifade etmektedir. Numunelerin donma-çözünme deneyine tabi tutulduktan sonra basınç dayanımlarında azalma olduğu görülmüştür.

Tablo 2’de mevcut numuneler ve fabrika üretimi numuneler üzerinde fiziksel farklılıkların tespiti için yapılan deneylerin sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; mevcut

numunelerin özgül ağırlıkları 2,67-2,72 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Fabrika üretimi numunelerde ise bu değer 3,10-3,23 gr/cm<sup>3</sup> arasındadır. Deney sonucunda fabrika üretimi numunelerin özgül ağırlıkları mevcut numunelere göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Birim hacim ağırlıklarına baktığımızda, birim hacim ağırlığı 1,8-2,1 gr/cm<sup>3</sup> olan mevcut numuneler, 2,1-2,2 gr/cm<sup>3</sup> fabrika üretimi numunelere göre daha azdır. Kılcal su emme miktarının mevcut numunelerde 145-152 gr, fabrika üretimi numunelerde ise 95-102 gr arasında olduğu, Porozite oranlarının ise mevcut numunede yüzde 25,7-27,4 iken fabrika üretimi numunelerde bu oranın yüzde 22,0-22,4 arasında değiştiği görülmektedir. Donma çözünme etkisi mevcut numunelerde en yüksek %20 iken fabrika üretimi numunelerde bu değer %15 olduğu görülmektedir.

**Tablo 1.** Mevcut ve fabrikasyon yöntemi ile üretilen numunelerin donma-çözünme öncesi ve sonrası basınç değerleri.

	Mevcut Numuneler						Fabrika Üretimi Numuneler					
	Numune Değerleri (MPa)						Numune Değerleri (MPa)					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
<b>Basınç Dayanımı</b>	3,0	3,1	2,9	2,6	3,5	2,8	4,5	4,5	4,3	4,5	4,5	4,4
<b>Donma Çözünme Sonrası Basınç Dayanımı</b>	2,4	2,4	2,3	2,0	2,9	2,2	3,8	3,8	3,6	3,8	3,8	3,7

**Tablo 2.** Mevcut numuneler ve fabrika üretimi numuneler üzerinde fiziksel deney sonuçları

		Mevcut Numuneler						Fabrika Üretimi Numuneler					
		Numune Değerleri						Numune Değerleri					
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
	<b>Özgül Ağırlık (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,72	2,70	2,67	2,70	2,68	2,67	3,10	3,13	3,12	3,13	3,13	3,10
	<b>Birim Hacim Ağırlık (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,1	1,8	1,9	1,9	1,8	2,1	2,2	2,1	2,2	2,2	2,1	2,2
<b>Fiziksel Deneyler</b>	<b>Kılcal Su Emme Miktarı (Kapilarite) (gr)</b>	145	150	148	152	146	149	95	100	97	102	102	100
	<b>Porozite (%)</b>	26,9	25,7	26,4	27,3	27,4	26,9	22,1	22,0	22,4	22,1	22,3	22,3
	<b>Donma-Çözünme Etkisi (Dayanım Kaybı) (%)</b>	20	19,6	18	22	20	21	15	15	15	15	15	15
	<b>Aşınma (cm<sup>3</sup>)</b>	15,2	15,0	15,1	14,7	14,5	15,2	11,3	11,3	11,4	11,3	11,2	11,2
<b>Isıl Özellik Deneyleri</b>	<b>Katı Cisimlerin Isı İletim Katsayısı Tayini (W/mK)</b>	0,95	0,96	0,96	----	----	----	1,08	1,07	1,07	----	----	----

**Tablo 3.** Mevcut ve fabrika üretimi numunelerin fiziksel deneylerin sonuçları

	Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Kılcal Su Emme (gr)	Porozite (%)	Donma- Çözünme Etkisi (%)	Aşınma (cm <sup>3</sup> )	Katı Cis. Isı İlet. Katsy. Tay. (W/mK)
<b>Mevcut Numune</b>	2,69	1,1	148,3	26,75	20,08	14,9	0,95
<b>Fabrika Üretimi Numune</b>	3,15	2,1	99	22,20	15	11,2	1,07

Tablo 3’de mevcut ve fabrika üretimi harman tuğlalara uygulanan fiziksel deneylerin aritmetik ortalaması alınarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Tabloya baktığımızda; mevcut numunelerin özgül ağırlıkları ve birim hacim ağırlıklarının fabrika üretimi numunelere göre daha düşük olduğu, kılcal su emme değerlerinin ise mevcut numunelerin su emme miktarının fabrika usulü numuneye oranla daha fazla olduğu görülmüştür. Numunelerin porozite değerleri karşılaştırıldığında mevcut numunelerin daha gözenekli bir yapıya sahip olduğu ve bu gözenekli yapısından dolayı ısı iletiminin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Başka bir deyişle geleneksel olarak elle üretilen mevcut numuneler ısı yalıtım özelliği bakımından fabrika üretimi numuneye göre daha üstün nitelikte olduğu

gözlenmiştir. Fabrika üretimi numunelerin donma-çözünmeye karşı daha dayanıklı, aşınma deneyine tabi tutulan mevcut numunelerin aşınma miktarının fabrika üretimi numunelere göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

### 3.2. Mevcut ve fabrika üretimi numunelerin mekanik deney sonuçları

Tablo 4’ de mevcut numunelerin basınç dayanımı 2,6-3,5 MPa iken, fabrika üretimi numuneler 4,3-4,5 MPa arasında değişmektedir. Yarmada çekme dayanımına baktığımızda mevcut numunelerin 0,37-0,5 MPa arasında olduğu, fabrika üretimi numunelerin ise 0,61-0,65 arasında olduğu görülmektedir.

**Tablo 4.** Mevcut ve fabrika üretimi numuneler üzerinde yapılan mekanik deney değerleri

		Mevcut Numuneler						Fabrika Üretimi Numuneler					
		Numune Değerleri (MPa)						Numune Değerleri (MPa)					
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
<b>Mekanik Deneyler</b>	<b>Basınç Dayanımı</b>	3,0	3,1	2,9	2,6	3,5	2,8	4,5	4,5	4,3	4,5	4,5	4,4
	<b>Yarmada Çekme Dayanımı</b>	0,43	0,43	0,41	0,37	0,5	0,4	0,65	0,65	0,61	0,65	0,6	0,64

Tablo 5’de mevcut ve fabrika üretimi numunelere uygulanan mekanik deney değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak bulunan sonuçlar verilmiştir. Tabloya göre gerek basınç dayanımı gerekse yarmada çekme dayanımında fabrika üretimi numuneler mevcut numunelere göre daha üstün niteliktedirler.

**Tablo 5.** Mevcut ve fabrika üretimi numunelerin ortalama mekanik deney sonuçları

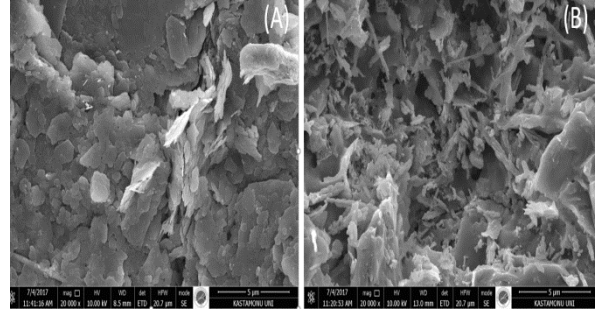
	Basınç Dayanımı (MPa)	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)
<b>Mevcut Numune</b>	2,98	0,42
<b>Fabrika Üretimi Numune</b>	4,45	0,64

### 3.3. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri

SEM, odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşerek numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretir. Elektron demeti raster (hücresel) tarama düzeni ile yüzeyi tarar ve demetin konumu, algılanan sinyalle eşleştirilerek görüntü oluştururlar. Çalışmamızda kullanılmak üzere SEM görüntülerini almak için FEI marka Quanta FEG 250 model SEM cihazı kullanılmıştır.

Bir malzemede aranan en önemli özellik porlu yapının düzenli ve kristal yapıda olmasıdır. Şekil 6 A' da fabrikasyon yöntemiyle üretilen harman tuğlasının düzenli, lifli, grain (katmanlı) ve mikro porlu yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca malzemenin kristal yapısında görülen grainlerin homojen ve çok ince katmanlı "leaf like" yapılar olduğu gözlenmektedir. Fabrikasyon yöntemiyle üretilen harman tuğlası verilen SEM görüntüsüne göre uzun süre homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Bu da basınca karşı dayanımının artmasını sağlamaktadır.

Şekil 6 B'da SEM görüntüsü verilen geleneksel yöntemle üretilen numunenin porozitesinin çok yüksek makro porlu ve düzensiz kristal yapısında olduğu göstermektedir. Geleneksel yöntemle üretilen ve eşit sıcaklıkta ısıl işlem görmeyen numunelerin grain yapısı kırılğan olmaktadır. Bu durum malzemenin basınç dayanımını da azaltacağı bir gerçektir. Geleneksel yöntemle üretilen numunelerde malzeme uzun süre karıştırılmalıdır. Çünkü homojen karıştırma sayesinde sinterleme öncesi numunenin çok daha homojen olacağı açıktır. Ancak geleneksel yöntemde açık havada uzun süre karıştırmadan kaçınmak amacıyla çoğu zaman sinterleme öncesi malzeme hamuru yeteri kadar homojen olmadan işlem kesilmekte ve sinterleme sürecine gidilmektedir. Ayrıca geleneksel yöntemde hamurun sinterleme adını da verdiğimiz ısıl işlem uygulanması sırasında yakma işlemine çok dikkat edilmeli, zamandan tasarruf etmek amacıyla yakma işlemi kısa sürdürülmemelidir.



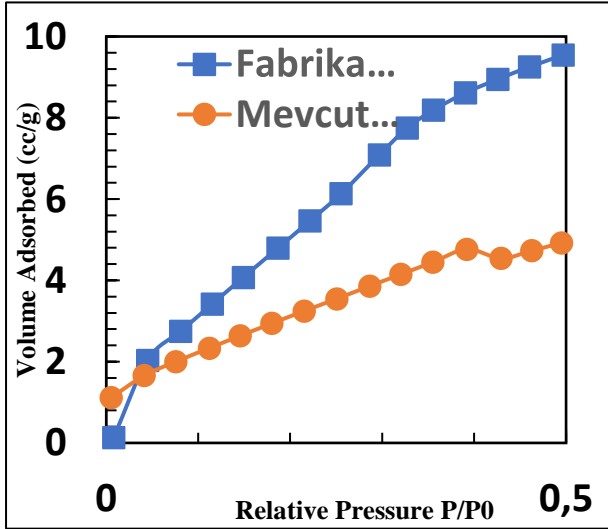
Şekil 6. A) Fabrikasyon ve B) Geleneksel yöntemlerle üretilen harman tuğlalarının SEM görüntüsü

### 3.4. BET değerleri

BET cihazı mikro, mezo veya makro boyutta gözenek içeren toz veya katı numunelerde fiziksel adsorpsiyon yöntemiyle gözenek boyutunu ve dağılımının yüksek ve düşük basınçlarda belirlenmesinde kullanılır. Yöntem, numune yüzeyinin tek bir moleküler tabaka ile kaplanması için gerekli gaz miktarının hesaplanması prensibine dayanır. Bu hesaplamada Brunauer Emmett ve Teller teorisi kullanıldığından cihazın yaygın bir diğer ismi BET'tir. Katalizörler, seramikler, mineral ve maden ürünleri, sinterlenmiş malzemeler, yapı malzemeleri, iyon değiştirici reçineler, aktif karbon, zeolit ilaç hammaddeleri, metalurjik tozlar, aşındırıcılar ve polimerler gibi katı ve toz haldeki birçok malzemenin yüzey alanlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

BET analizleri gözenekli yapı içeren katıların yüzey alanlarını, boşluk hacimlerini ve dağılımlarını ölçmekte kullanılır. BET uygulamalarında, Sıvı Azot, Azot ve Helyum gazları kullanılmaktadır. Çalışmamızdaki geleneksel el yapımı harman tuğlaları ve fabrikasyon yöntemleri kullanılarak üretilen numuneler, Quantachrome ToucWin marka model cihazla alınmıştır. Taşıyıcı gaz olarak 77.35 K sıcaklığında sıvı azot gazı kullanılmıştır. Ölçüm sonuçları Şekil 4'de verilmektedir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde; adsorpsiyon eğrileri neredeyse lineer bir doğru olarak görülmektedir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde SEM sonuçlarıyla tamamen benzerlik gösterdiği görülmektedir. Fabrikasyon yöntemiyle üretilen harman tuğlası örneklerinde yüzey alanı 28.96 m<sup>2</sup>/g iken geleneksel yöntemle üretilen

numunelerin yüzey alanı  $13.77 \text{ m}^2/\text{g}$  olarak ölçülmüştür. Buradan görüleceği üzere fabrikasyon yöntemi ile harman tuğlalarının yapısındaki gram başına yüzey alanı geleneksel olarak elle üretilenden iki kattan daha fazladır. Şekil 7’de de görüleceği üzere fabrikasyon yöntemi ile üretilen örneklerin yüzey alanı mikro porlardan makro porlara kadar belirli bir düzen halinde olduğu görülmekte, ancak geleneksel yöntemdeki porlarda maalesef mikro porlara rastlanılmamıştır. Porlar makropor niteliğindedir. Bu durum doğrusal nitelikte olan adsorpsiyon eğrilerinin sıfır basınçtaki kesişim noktasında da görülmektedir. Diğer bir deyişle fabrikasyon yöntemi ile üretilen doğrusal eğrinin kesişim noktası  $1.5 \text{ cm}^3/\text{g}$  iken geleneksel yöntemle el yapımı olarak üretilen numune eğrisinin başlangıç noktası çok düşük basınçlarda sıfır  $\text{cm}^3/\text{g}$  olarak görülmektedir. Buradan da görüleceği üzere fabrikasyon yöntemiyle üretilen harman tuğlaları hem çok küçük basınçlarda görülen çok miktarda mikropor yapısıyla, hem de belirli bir basınçtan sonra görülen ve geleneksel yöntemle üretilen numunelerden çok daha fazla makroporlu düzenli yapıya sahiptir.



Şekil 7. Mevcut ve Fabrika üretimi numunelere ait BET grafiği

Başka bir deyişle, fabrikasyon harman tuğlaları geleneksel yöntemle üretilen numune örneklerine göre çok daha üstün nitelikli por yapısına sahip olup, çok daha güçlü mekanik özellik gösterirler.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- ✓ Geleneksel olarak elle üretilen mevcut numunelerin özgül ağırlıkları, fabrikasyon yöntemiyle üretilen numunelere oranla daha düşüktür.
- ✓ Fabrika üretimi numunelerin birim hacim ağırlığı geleneksel yöntemle üretilen numunelere göre daha fazladır.
- ✓ Mevcut numunenin kılcal su emme oranı fabrika üretimi numuneye göre daha fazladır. Bu durum mevcut numunenin boşluklu yapısının yani porozitesinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.
- ✓ Mevcut numunenin aşınma miktarı fabrikasyon yöntemi ile üretilen numunenin aşınma miktarından daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Fabrika üretimi numunelerin basınca karşı daha dayanıklı olduğu görülmektedir.
- ✓ Zaman ve kullanılmışlık gibi parametrelerin mevcut numunelerde basınç dayanımı ve donma -çözünmenin basınca etkisi özellikleri üzerinde olumsuz etkilerinin olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ SEM görüntüleri incelendiğinde; fabrika üretimi numunelerin düzenli, mikro porlu ve lifli yapıda olduğu için makro porlu, düzensiz yapıya sahip olan mevcut numunelere kıyasla basınca karşı daha dayanıklıdır.
- ✓ BET verilerine göre; fabrika üretimi numune düzenli bir yapıda olduğu için gelen basınç mikro mezo ve makro porlarla aktarım şeklinde basınca dayanımlı olduğu görülmektedir. Fakat düzensiz yapıda olan geleneksel olarak elle üretilen mevcut harman tuğlası kırılğan yapısı dolayısıyla basınca karşı dayanımı düşüktür.
- ✓ Geleneksel olarak üretilen mevcut numunelerin çalışan ustalar tarafından karışım hesaplarının yapılması ve el yordamıyla karışımın hazırlanıp karılmasından dolayı homojen bir karışım sağlanmamıştır. Bu durum

mevcut numunenin fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. Fabrikasyon yöntemiyle üretilen numunelerde karışım hesaplarının yapılması, bilgisayarlı otomasyon sistemiyle hazırlanıp karılmasından dolayı homojen bir karışım elde edilmiştir. Bu yüzden fabrikasyon yöntemiyle üretilen numuneler mevcut numunelere göre daha üstün nitelikli olarak üretilmiştir.

- ✓ Mevcut harman tuğlaları açık alanda tuğla aralarına kömür tozu serilerek ısıtım işlem uygulandığı için tüm numuneler eşit sıcaklıkta pişmemiştir. Fabrikasyon yöntemiyle üretilen numuneler ise 900 °C derecede fırınlarda ısıtım işleme tabi tutulduğu için tüm numuneler homojen bir şekilde pişmiştir. Bu durum geleneksel olarak elle üretilen harman tuğlanın basınca dayanımının fabrika üretimi numuneye göre daha düşük olmasına neden olmuştur.
- ✓ Dış duvar dolgu malzemesi olarak kullanılan harman tuğla atmosfer şartlarına maruz kalacağı için aşınma, kılcal su emme, donma-çözünmeye karşı dayanım, basınç dayanımı gibi özelliklerinin üstün olması, fabrikasyon yöntemiyle üretilen harman tuğlanın rahatlıkla kullanılabilmesini göstermektedir.
- ✓ Fabrikasyon yöntemiyle üretilen harman tuğlaların gerek restorasyon gerekse dış duvar cephe kaplaması olarak kullanılabilmesi tespit edilmiştir.

## 5. Kaynaklar

1. Yılmaz, A., Koçu, N., Demircan, H., (2015). Örnek konutlar üzerinden geleneksel kastamonu evlerinin yapı fiziği açısından incelenmesi. 2. *Ulusal Meslek Yüksekokulları Sosyal Ve Teknik Bilimler Kongresi*, 365-377.
2. Eyüpgiller, K. (1999). Bir kent tarihi Kastamonu. Eren Yayıncılık, İstanbul, 24s
3. Perker, Z., (2012). Geleneksel Cumalıkızık konutlarında cephe özellikleri ve günümüzdeki durum, 6. *Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, 420-432.
4. Akdemir, M., ve Korkmaz E., (2010). Geleneksel konut dokularında malzemenin çatı ve cephe kuruluşuna etkileri: batı karadeniz bölgesi örneği, 5. *Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, 622-630.
5. Yılmaz, A., Korkmaz, S.Z., (2016). Geleneksel abana evlerinde kullanılan dış cephe malzemeleri, 1. *Uluslararası Abana Sempozyumu*, 250-261.
6. Başarı, B., Diri, B., (2014). Bina cephelerinin yenilenmesinde kullanılan stratejiler. 7. *Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, ss. 1-10.
7. Koca, G., As, N., Arıoğlu, N., (2013). Ahşap dış cephe kaplama elemanları. 7. *Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, ss. 1-7.
8. TS 705, (2005) Fabrika tuğlaları-Duvarlar için dolu ve düşey delikli, *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.
9. Akman, M.S., (1997). Building materials in early ages of mankind. *International Conference on Studies in Ancient Structures*. Edited by Özşen. G., p. 177186.
10. Çiçek, Y.E., (2002). Pişmiş toprak tuğla, bimsbeton, gazbeton ve perlitli yapı malzemelerinin fiziksel kimyasal ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 123-124s
11. Kılınçarslan, Ş., Başyigit, C., Aktaş, H., Çankıran, O., Ürgüp, M. N., Uzun, İ., (2007). Yalvaç Pisidia Antiocheia kentinde kullanılan tuğla ve bağlayıcı malzemelerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2: 1-6 s.
12. Sömer O., (2014). Antik yapılarda kullanılan tuğla malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin saptanması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 83-85 s.
13. TS EN 772-4, (2000) “Kâgir birimler- deney metodları- bölüm 4: tabii taş kâgir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile boşluksuz ve boşluklu birim hacim kütlelerinin tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
14. TS EN 772-11, (2012). Kâgir birimlerde kapiler su emme ve kil kâgir birimlerde ilk su emme hızının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
15. Sürül, O., (2015). Yüksek fırın cürufu ve uçucu külün tuğla üretiminde katkı olarak kullanılmasının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 56-58 s.
16. TS CEN/TS 12390-9, (2012). çabuk donma ve çözünme koşulları altında betonda dayanıklılık faktörü tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- 17.** TS 2824 EN 1338, DIN 52108, (2002), Testing of inorganic non-metallic materials – wear test using the grinding wheel according to boehme-grinding wheel method, Germany.
- 18.** Gencil, O., (2015). Characteristics of fired clay bricks with pumice additive. Energy and Buildings, **102**: 217-224 s.
- 19.** TS EN 772-1, (2015). Kâgir birimler-deney yöntemleri-bölüm 1: basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- 20.** TS EN 12390-6, (2010). Beton-sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 6: deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.



## Hatunköy (Hazar Gölü'nün Doğusu, Elazığ) Civarındaki Denizel Sedimanter ve Volkanosedimanter Kayaçların Jeokimyasal Özellikleri

Dicle BAL AKKOCA, Burhan DAŞ

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye  
dbalfirat.edu.tr

(Geliş/Received: 06.11. 2017; Kabul/Accepted: 10.07. 2018)

### Özet

Bu çalışmada Elazığ İli'nin yaklaşık 30 km güneydoğusunda Hatunköy civarında Hazar Grubu ve Maden Grubu'na ait örneklerin jeokimyasal özellikleri çalışılmıştır. Hatunköy'e ait Maden Grubu ve Hazar Grubu örneklerinin major oksit elementleri, iz elementler, nadir toprak elementleri (NTE) önemli oranda benzerlik sunmaktadır. Log (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)' e karşı log (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/K<sub>2</sub>O) oranına göre her iki grupta örneklerin çoğunluğu Fe' ce zengin şeyl özelliğini göstermektedir. Örneklerin Th, Cs, Zr, Ba, Rb, Hf, Nb, U, Th içerikleri Arkean sonrası kıtasal karakterli felsik özelliği temsil eden Avustralya Şeylleri'ne (PAAS) göre daha düşük, Sc, Ni, V ve Co değerleri daha yüksektir. La / Sc ve Th / Co oranları iki grubunun benzer, çoğunlukla asidik ve bazik kaya türleri arasında ortaç bileşimde olduğunu göstermektedir. Hf elementine karşı La/Th diyagramında, her iki grup örneğin benzerliği ve andezitik adayayı alanına düştüğünü görülmektedir. La/Sc, Ti/Zr oranları örneklerin okyanus adayayı ortamında depolanmış kayaçlardan türediğini göstermektedir. Si' a karşı Na/K diyagramında örnekler okyanusal adayayı alanına düşmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Çamurtaşı, Jeokimya, Maden Grubu, Hazar Grubu, Elazığ.

### Geochemical Characteristics of Marine Sedimentary and Volcano-Sedimentary Rocks Around Hatunköy (East of Hazar Lake, Elazığ)

**Abstract:** In this study, geochemical features of the Hazar Group, and Maden Group have been studied around Hatunköy, approximately 30 km southeast of Elazığ. The major oxide elements, trace elements, rare earth elements (REE) of the samples show distinctive similarities. The majority of the samples in both groups exhibit Fe-rich shale properties, according to the log (SiO<sub>2</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) versus log (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / K<sub>2</sub>O) ratio. The contents of Th, Cs, Zr, Ba, Rb, Hf, Nb, U, Th of the samples are lower, Sc, Ni, V and Co values are higher than those of the Post Archean Australian Shales (PAAS) which represent the continental felsic character. The La / Sc and Th / Co ratios show that the two groups are similar in composition, mostly between acidic and basic rock types. It is shown that, both groups are fall in the similar area of andesitic arc field in the La / Th diagram against Hf. The La / Sc and Ti / Zr ratios showed that the samples were formed in the oceanic island environment. In the Na / K diagram versus Si, the samples fall into the oceanic island environment field.

**Keywords:** Mudstone, Geochemistry, Maden Group, Hazar Group, Elazığ.

### 1. Giriş

İnceleme alanı Elazığ İli'ni güneydoğusunda 1/25.000 ölçekli Elazığ K42c3, K43d4, L42b2, L43a1 paftalarında yer almaktadır (Şekil 1). Çalışma konusu birimler Hatunköy civarındaki Maastrichtiyen-Alt Eosen yaşlı Hazar Grubu'na ait gri-yeşil renkli çamurtaşları ile Orta Eosen yaşlı

Maden Gurubu'na ait volkanoklastitlerle aralanmalı kırmızı renkli çamurtaşlarıdır.

Hatunköy civarında yayılım gösteren bu formasyonlarla ilgili daha önce yapılmış genel jeoloji, petrografik ve jeokimyasal çalışmalar mevcuttur. [1] Hazar Gölü'nün yakın kuzeyinde Şebken civarında Hazar Gurubu ve Maden Grubu'na ait sediman ve volkanitlerin

petrografisini, [2] inceleme alanına yakın bölgenin tektonik özelliklerini çalışmıştır Çelik [3]. Master Dağı (Elazığ güneydoğu'su) civarında çalışmış ve özellikle inceleme alanındaki Hazar Grubu'na ait gri-yeşil renkli çamurtaşlarından oluşan Simaki Formasyonu'nun oluşumuna açıklık getirmiştir. Hazar Grubu'nun başlangıçta sığ ortamda çökeldiğini alttaki Elazığ Magmatitleri'nden malzeme adığını belirtmiştir. Hazar Grubu'na ait Simaki Formasyonu'nun gri-yeşil renkli çamurtaşları Elazığ Magmatitleri'nden malzeme aldığına göre bu birim ile Maden Grubu'na ait volkanizmadan etkilenmiş kırmızı renkli çamurtaşları bileşimlerinin karşılaştırılması Elazığ Magmatitleri ile Maden Grubu'na ait magmatik kayaçların karşılaştırılmasını sağlayacaktır. Böylece bileşim, oluşumları ve tektonik ortamlarına ait birçok farklı görüş olan bu iki birimin jeokimyasal olarak karşılaştırılması, oluşum ve tektonik ortamlarına açıklık getirilmesini sağlanacaktır. Bunun için inceleme alanında Hatunköy kesitinden iki farklı formasyona ait örneklemeler yapılmış olup, daha önce çalışma alanına yakın olan Şebken Köyü civarındaki Hazar Grubu sedimanlarından alınan Hazar Grubu'na ait veriler [4] jeokimyasal olarak karşılaştırılmıştır.

## 2. Jeoloji

Araştırılan sahadaki birimler yaşlıdan gence doğru; Geç Jura-Alt Kretase yaşlı Guleman Ofiyoliti, Senoniyen yaşlı Elazığ Magmatitleri, Maastrichtiyen-Alt Eosen yaşlı Hazar Grubu, Orta Eosen yaşlı Maden Grubu ve Pliyo-Kuvaterner, Kuvaterner yaşlı alüvyonlardır (Şekil 2). Hatunköy ve çevresinde inceleme alanında en altta yer alan Geç Jura-Alt Kretase yaşlı Guleman Ofiyolitleri litolojik olarak harzburjit, dünit, verlit, pirokсенit, gabro, bantlı gabro ile bunları kesen diyabaz dayklarından oluşan ofiyolitik bir istiftir. Guleman Ofiyolitleri'nin oluşumu ile ilgili olarak bir çok araştırmacı Bitlis-Pütürge Masifleri ile Keban-Malatya Masifleri arasındaki Neotetis'in güney koluna ait

okyanusal kabuğun, Geç Kretase'den itibaren güneye doğru kıtasal kabuk üzerine yerleştiklerini kabul ederler [5-6]. Karşılaştırma yapılan Şebken'in kuzeyi ve batısında, Hatunköy'ün güney doğusunda yer alan Elazığ Magmatitleri andezitik bazik bileşimli lavlar, dasitik dayklar ile üst kesimlerdeki tüf ve piroklastiklerden oluşmaktadır. Hemton [7] Elazığ Magmatitleri'nin oluşumunu Geç Kretase'de başlayan bir dalma batma sonucunda okyanusal bir levhanın diğer bir okyanusal levha altına daldığı sırada derinlik derecesine göre biribiri arkasından gelişmiş ilkel ensimatik bir ada yayı olarak yorumlamıştır. Hazar Grubu Robertson [8] tarafından adlandırılmış ve alttan üste doğru Ceffan Formasyonu, Simaki Formasyonu ve en üstte de Gehroz Formasyonu olmak üzere üç formasyona ayırmışlardır. En iyi Hazar Gölü çevresinde görüldüğünden, birim adını buradan almıştır. Hatunköy'ün kuzeyinde ise Guleman Ofiyolitleri üzerinde uyumsuz olarak durmaktadır.

Hatunköy kesitinde Simaki Formasyonu hakimdir (Şekil 3a). Formasyon, altta gri-yeşil renkli ince-orta tabakalı, yer yer kumlu kireçtaşı mercek ve bantları içeren kumtaşı-çamurtaşı-marn ardalı ile başlayıp üste doğru koyu gri renkli kalın tabakalı kireçtaşları ile son bulur. Erdem [1] Hazar Grubu'nun daha önce oluşmuş olan Elazığ Magmatitleri'nden malzeme aldığına belirtmiştir.

Maden Grubu'nu ilk defa Rigo de Righi ve Cortesini [9] "Maden Birimi" olarak adlandırmıştır. Yazgan [10]. Maden Grubu olarak isimlendirmişlerdir. İnceleme alanında Maden sedimanter kayaçları içerisinde gözlenen volkanitlerden dolayı oldukça karışık bir yapı sunmaktadır. İnceleme alanında Maden Grubu'na ait kırmızı renkli çamurtaşları volkanosedimentler, andezitik bazaltik lavlar ve onları kesen dasit daykları ile aglomeralar ve pembe- gri kireçtaşları mevcuttur (Şekil 3b).

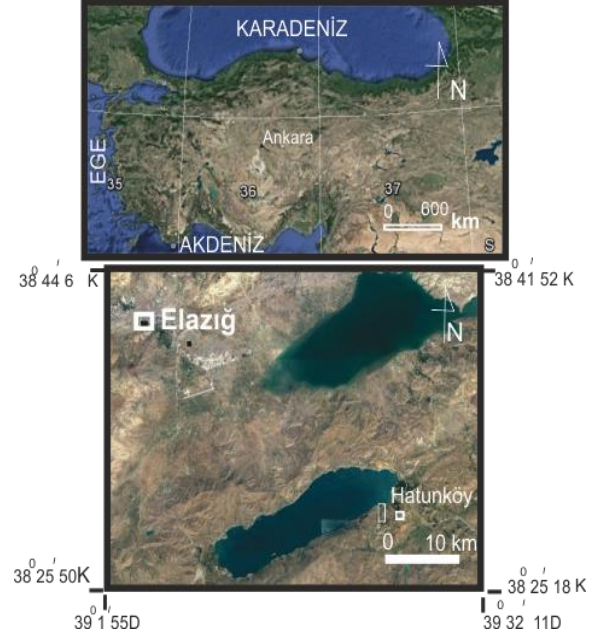
Maden Grubu oluşumu ile ilgili değişik görüşler mevcuttur. Elazığ-Malatya dolaylarındaki

çalışmasında Maden Grubu'nun volkanik ve magmatik kayaların, genç bir kıta kabuğu üzerine yerleşen etkin bir kıta kenarı ürünü olduğunu belirtmişlerdir. Yiğitbaşve Yılmaz [12] ise Maden Volkanitleri'ni Elazığ Magmatitleri'ni oluşturan Senoniyen yaşlı adayayının gerisinde oluşmuş yay gerisi havza olarak tanımlamışlardır Erdoğan [13], Ertürk ve Beyarslan [14], Tanyıldızı [15], Maden volkanik kayalar ile ilgili, ensimatik ve toleyitik bir ada yayı volkanizması ürünü olan volkanik yaydan bahsetmişlerdir.

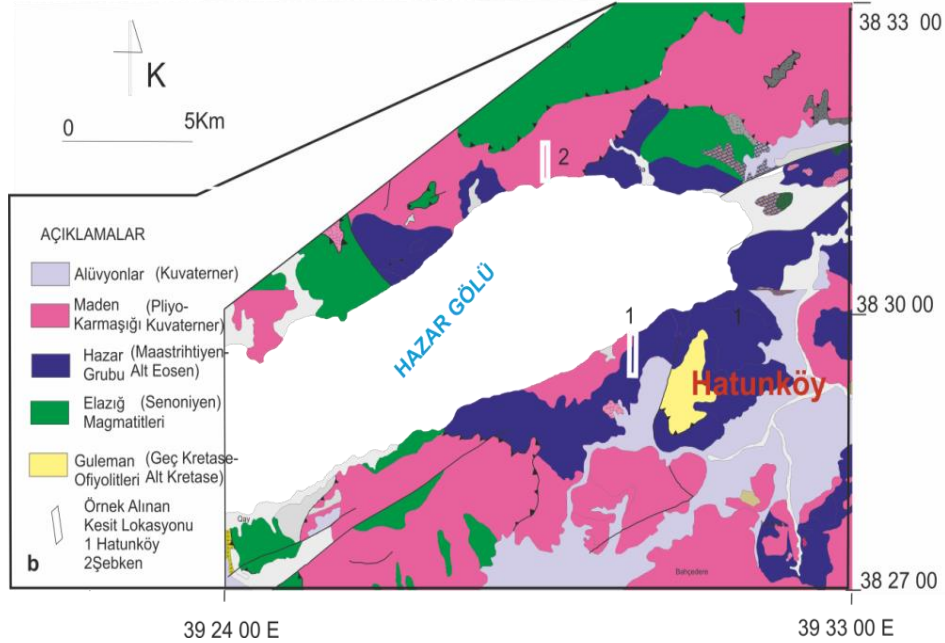
Alüvyonlar tüm birimleri uyumsuz olarak örtmektedir. Gevşek malzemeli olup Pliyo-Kuvaterner ve Kuvaterner yaşlı olup çakıl boyutundan kil boyutuna gevşek malzemeden oluşur.

### 3. Materral ve Metod

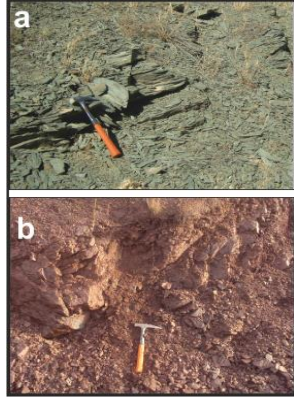
Örnekleme yapılan kesit Hatunköy'ün yaklaşık 1 km kuzeybatısındadır (Şekil 2). Bunun için Hatunköy civarında Hazar Grubu'ndan, ve



Şekil 1. İnceleme alanının yerbulduru haritası



Şekil 2. İnceleme alanının jeolojik haritası (MTA 1/500000 ölçekli haritasından [11] derlenilmiştir)



**Şekil 3.** a. Hazar Grubu Simaki Formasyonu'na ait gri-yeşil çamurtaşlarından görünüm. b. Maden Grubu'na ait kırmızı renkli çamurtaşları, Hatunköy'ün yaklaşık 1 km kuzeybatısı.

altta kırmızı renkli çamurtaşlarından oluşan Maden Grubu'ndan 15 adet örnek alınmıştır (Şekil 2). Örneklerin major, iz element içerikleri ICP-AES ile, Nadir Toprak Elementleri (NTE)'ler ICP-MS ile ACME Analitik Laboratuvarında (Kanada) yapılmıştır. Ana, iz ve nadir toprak elementler 1150 °C'de platin-altın krozeeye 1/5 oranında numune ve lityumtetraborat ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) katılmasıyla elde edilmiş cam pelletlerde ICP-AES ve ICP-MS tekniği ile ölçülmüştür. Korelasyon analizleri  $\alpha = 0.05$  önemlilik derecesine göre değerlendirilmiştir.

## 4. Bulgular ve Tartışma

### 4.1. Major ve iz element jeokimyası

Hatunköy kesiti Hazar Grubu, Maden Grubu, ve Şebken kesitine ait Hazar Grubu verilerinin ortalaması [4] major, iz element konsantrasyonları, aritmetik ortalama ( $\bar{x}$ ), standart sapma değerleri (St.Sp.). Tablo 1-2'de verilmiştir. Ayrıca üst kıtasal kabuk felsik bileşimini temsil eden Arkean sonrası Avustralya Şeylleri (PAAS) referans olarak verilmiştir. İnceleme alanındaki Hazar Grubu, Maden Grubu ve Şebken Kesiti ortalamaları Tablo 1-2'den görüldüğü üzere benzer değerler sunmaktadır.

Korelasyon analizleri element birlikteliklerini ortaya koyarlar [16]. Major elementlerinin korelasyon katsayıları Şekil 4a' da görülebilmektedir. Ca dışındaki Si, Fe, Na, Ti, K ve P elementleri Al ile pozitif korelasyon göstermektedir. PAAS'a göre örneklerin  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , CaO, MgO, Mn ve  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  içerikleri daha yüksek,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  içerikleri daha düşüktür (Şekil 4b).  $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ ' e karşı  $\log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$  oranına göre Herron [17] her üç örnek grubunun çoğunluğu Fe' ce zengin şeyl, Hazar Gurubu'na ait 2 örnek Fe kum alanına düşmektedir (Şekil 4c).

Jeokimyasal çalışmalarda, klastik tortulların  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiO}_2$  oranları, kaynak alanın ortalama bileşimini göstermektedir ve genellikle artan  $\text{SiO}_2$  içeriğiyle birlikte artmaktadır. Çoğu magmatic kayacda Ti, mafik minerallerde (örneğin piroksen, hornblend, klorit, biyotit, ilmenit) ve feldispatlarda Al bulunur.

$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiO}_2$  oranlarını mafik kayalar için 3-11, ortaç bileşimli kayalar için 11-21 ve felsik kayalar için 21-70 aralığındadır [20].

Hatunköy Hazar Gurubu, Maden Gurubu ve Şebken-Hazar Gurubu örnekleri için ortalama  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiO}_2$  oranları sırasıyla 16.27, 17.1, 16.3'tür (Tablo 1). Değerlere göre Hazar Grubu örneklerinde H1, Maden Grubu örneklerinden M4 örneği bazik, M2, M3, M6 ortaç-felsik sınırında iken, sırasıyla diğer örnekler ortaç ortaç bileşim özelliğine uymaktadır. Bu şekil 4b ile de doğrulanmaktadır. Her üç kayaç gurubunda major elementler ağırlıklı olarak ortaç karakterli olmasından dolayı kıtasal karakterli felsik karakterli olan PAAS'dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , CaO, MgO ve  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  içerikleri daha yüksek,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  içerikleri daha düşüktür.

Nb/Y a karşı Zr/Ti volkanik kayalar için kullanılan ayırım diyagramı olmakla birlikte sedimanların köken magmatik kayaç bileşimi tespitinde kullanılmaktadır [21, 22, 23]. Bu diyagramda örnekler 1 Maden Grubu subalkali bazalt, 1 Hazar Grubu alkalin bazalt, 2 Hazar Grubu trakiandezit, 1 riyodasit/dasit alanına düşmekte olup genel olarak andezit alanına düşmektedir (Şekil 5a).

**Tablo 1.** Hatunköy Hazar Grubu, Maden Grubu, Şebken örnekleri ve ortalama PAAS (değerler Taylorve McLennan [18]' den alınmıştır) major element içerikleri FeO\*:Toplam FeO.

Örnek	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe2O*	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	Top.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>
H-1	42.68	10.69	7.99	6.03	13.37	1.17	1.16	0.77	0.17	0.13	0.046	12.5	99.85	16.5
H-2	50.73	13.48	9.75	7.06	6.07	1.94	1.2	0.94	0.15	0.13	0.06	1.4	99.92	21.17
H-3	59.21	15.47	7.62	4.51	2.31	4.45	0.79	0.84	0.13	0.09	0.039	35.1	99.80	12.09
H-4	39.21	9.86	6.66	4.00	17.54	0.85	1.4	0.7	0.12	0.16	0.103	27.8	99.84	17.42
H-5	48.91	11.55	6.47	4.40	11.6	2.58	0.81	0.7	0.1	0.19	0.042	10.1	99.83	18.52
H-6	57.89	10.87	8.2	10.86	10.2	0.11	0.97	0.23	0.12	0.04	0.012	15.6	99.85	13.88
H-7	17.52	1.33	1.14	1.38	42.82	0.18	0.06	0.11	0.05	0.05	0.072	8.30	99.85	14.34
H-8	25.84	5.4	3.48	2.98	32.4	0.76	0.57	0.31	0.1	0.14	0.024	4.30	99.81	18.42
H-9	51.11	12.41	7.27	4.77	9.26	1.62	2.13	0.67	0.16	0.24	0.069	19.2	99.84	14.09
Ort.	43.68	10.12	6.51	5.11	16.17	1.52	1.01	0.59	0.12	0.13	0.05	14.92	99.84	16.27
St.Sap.	14.14	4.30	2.63	2.70	13.14	1.36	0.58	0.29	0.04	0.06	0.03	10.96	0.03	2.89
M-1	29.44	7.84	4.71	3.44	27.33	0.54	1.26	0.43	0.08	0.21	0.02	24.6	99.86	18.23
M2	47.7	12.06	6.97	3.28	12.12	0.88	3.28	0.59	0.13	0.43	0.029	12.4	99.85	21.44
M3	56.3	15.68	8.08	5.78	1.94	2.31	1.34	0.74	0.14	0.5	0.025	7.0	99.81	21.19
M4	50.48	15.64	10.07	3.52	5.94	4.77	2.96	1.9	0.32	0.16	0.007	4.0	99.79	8.23
M5	56.95	15.52	8.71	4.83	2.57	4.81	0.69	0.86	0.17	0.22	0.018	4.4	99.80	18.05
M6	64.46	15.78	5.18	1.94	1.23	7.43	0.09	0.66	0.24	0.08	0.006	2.8	99.88	23.91
Ort.	48.56	11.17	6.49	3.92	12.45	2.29	1.25	0.7	0.15	0.18	0.04	9.2	99.8	17.1
St.Sap.	16.96	4.55	2.52	1.72	12.68	2.14	0.92	0.41	0.07	0.13	0.03	7.6	0.02	3.90
Şeb. ort	46.49	10.2	6.07	3.57	14.88	1.76	1.41	0.66	0.14	0.21	0.04	17..5	99..78	16.3
PAAS	32.8	18.9	6.50	2.20	1.30	1.20	3.70	1.00	0.16	0.11	0.007	0.007	...	18..9

**Tablo 2.** Hatunköy, Şebken örnekleri ve PAAS [18] iz element içerikleri.

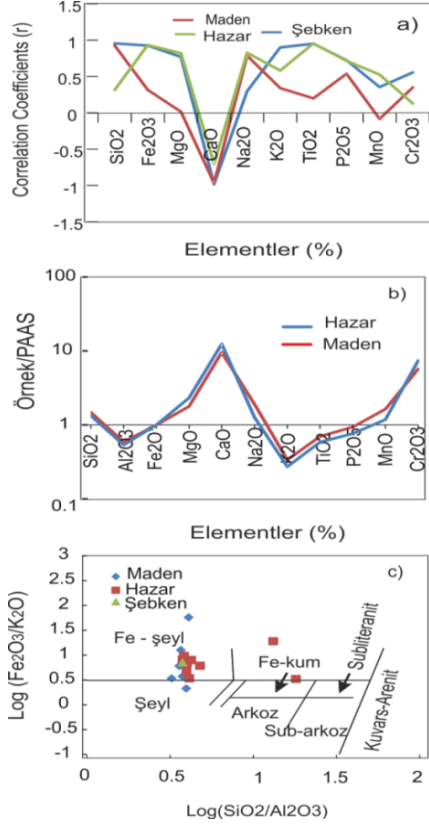
Örn.No:	Sc	Ba	Co	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sr	Ta
H1	21	104	33.3	1.5	11.3	2.7	11.2	35.7	281	0.8
H2	27	108	36.1	2	15.8	2.6	15.1	33.3	205.3	0.9
H3	25	114	24.1	0.7	13.6	3.3	19.5	19.7	602.5	1.2
H4	20	153	28.9	1.4	10.3	1.9	10	42.8	508.4	0.7
H5	20	102	22.5	1.5	11	1.7	10.9	21.6	289.8	0.5
H6	6	101	12.7	0.4	5.8	1.3	6.6	29.7	14.7	0.5
H7	3	17	6.5	0.1	0.7	0.9	1.6	1.8	1413.9	0.2
H8	10	80	15.9	1.3	5.4	1.2	4.4	17.2	774.5	0.3
H9	21	296	31.5	1.6	14.2	2.9	7.8	43.6	268.9	0.4
ort	17	119.44	23.50	1.17	9.79	2.06	9.68	27.27	484.33	0.61

**Tablo 2.** Hatunköy, Şebken örnekleri ve PAAS [18] iz element içerikleri (Devam)

Örn.No:	Sc	Ba	Co	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sr	Ta
M1	13	134	19.2	1.4	8.1	1.6	6.4	35.4	382.1	0.4
M2	19	209	32	3.2	12	2.4	8.6	93.1	193	0.6
M3	26	134	34.6	1.9	16.4	2.6	6.8	32.8	233.6	0.3
M4	28	367	21.7	1	16.5	4.5	16.7	54.6	239.6	1.5
M5	27	119	34.2	0.3	13.3	3.1	6.8	12.4	578.1	0.4
M6	18	29	6	0.1	15.2	3.4	3.3	0.9	184.8	0.1
ort	21.83	165.33	24.62	1.32	13.58	2.93	8.10	38.20	301.87	0.55
St.sap.	6.047	114.257	11.229	1.141	3.216	0.987	4.550	32.793	152.864	0.493
Şebkenort	20.91	302.09	34.79	2.28	12.95	2.61	12.28	41.96	206.35	0.74

**Tablo 2.** Hatunköy, Şebken örnekleri ve PAAS [18] iz element içerikleri (Devam)

Örn.No:	Th	U	V	Zr	Y	Cu	Pb	Zn	Ni	As	TiO <sub>2</sub> /Zr
H1	3.2	0.9	145	87.4	17.1	61.6	6.2	80	289.2	2.8	88.10
H2	2.9	0.7	194	94	17.6	65.2	4.7	89	202.8	1.3	100.00
H3	3.2	0.8	147	129.7	24.1	51.8	3.5	74	124.8	1.9	64.76
H4	2.6	1.1	133	77.2	15.6	46.3	4.7	66	329.8	4.2	90.67
H5	2.1	0.4	147	74.8	17.1	57	8.8	69	134	1.9	93.58
H6	3.2	0.4	38	46.3	11	31.4	3.2	41	28	0.6	49.68
H7	0.4	0.5	30	29.4	7.2	5	1.5	9	48.6	9.7	37.41
H8	2.3	0.6	64	44.1	12.6	28.3	5.1	54	134.3	0.5	70.29
H9	4.8	1	163	87.9	20	56.7	4.7	74	171.6	4.6	76.22
Ort	2.74	0.71	117.89	74.53	15.81	44.81	4.71	61.78	162.57	3.06	15.43
St.sap.	1.17	0.26	58.63	30.69	5.01	19.61	2.04	24.29	99.90	2.88	5.07
M1	3.5	1.3	95	57.8	13.7	65.4	6.9	56	118.5	0.5	74.39
M2	5.7	1.1	119	83.7	21.9	1.5	14.3	87	158.2	7.9	70.49
M3	4.3	1.2	176	89.3	22.6	277.5	6.4	112	134.9	3.2	82.87
M4	2.1	0.6	315	155.9	29	8.8	1	40	10.3	0.6	121.87
M5	2.4	0.4	178	99.4	28.1	91.5	2.8	93	118.3	2.1	86.52
M6	3.6	0.6	77	108.6	30.7	14.9	10.5	79	7.9	3.8	60.77
Ort.	3.60	0.87	160.00	99.12	24.33	76.60	6.98	77.83	91.35	3.02	70.62
St sap.	1.31	0.38	86.49	32.73	6.30	104.64	4.89	26.04	65.36	2.74	5.20
Şebk.ort	4.15	1.03	141.91	92.80	20.02	50.50	10.93	76.82	190.80	5.93	8.48
PAAS	16	650	23	15	20	5	19	160	200	...	529.1



**Şekil 4.** Hatunköy ve Şebken örneklerinin a.  $Al_2O_3$  elementi ile major oksit elementlerin korelasyon katsayıları. b. Majör oksitlerin PAAS'a normalize diyagramı (PAAS Taylor ve McLennan [18]' den alınmıştır). c.  $\log(SiO_2/Al_2O_3)$ ' e karşı  $\log(Fe_2O_3/K_2O)$  oranına göre Herron [17] sınıflaması

Şekil 5b'de iz elementlerde de Hatunköy örnekleri ve Şebken örneklerinde PAAS'a göre Th, Cs, Ba, Rb, Hf, Nb, U daha düşük, Sc, Ni, V ve Co daha yüksektir, bu da örneklerin kıtasal karakterli PAAS'a göre daha az felsik karakterli olmasından kaynaklanmaktadır. Th, Cs, Zr, Ba, Rb, Hf, Nb, U felsik kayalarda daha yüksektir [24]. Sc, V, Co elementleri mafik kayalarda daha çok zenginleşir [25].

Ti ve Zr sedimanların kaynak kaya bileşiminin tespitinde sıkça kullanılmaktadır.  $TiO_2/Zr$  oranı mafik kayalarda  $>200$ , ortaça kayalar için 195-55 arasında, felsik kayalarda  $<55$ 'dir. Tablo 2'de görüldüğü üzere bu oran Hazar örnekleri'nde 23-

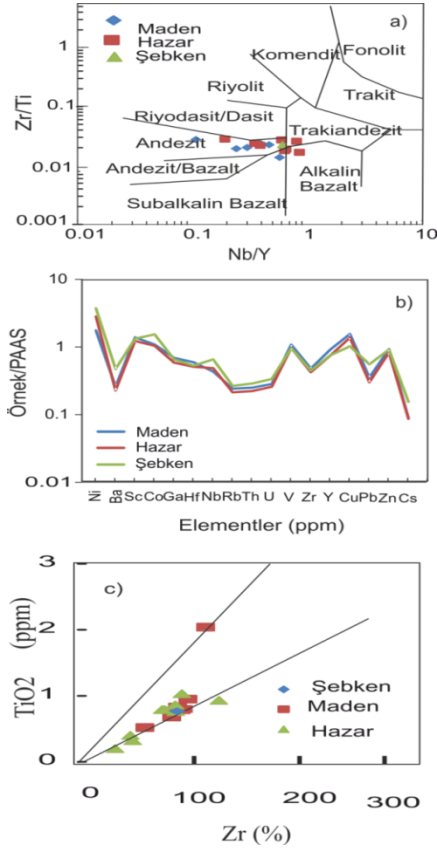
59, Maden örnekleri'nde 36-73 arasında, Şebken örneklerinde ortalama 55 olup bu oranlar felsik ve ortaça karakterli kayalara uymaktadır. Şekil 5c' de incelenen numunelerin Bhatia ve Taylor [26] tarafından önerilen  $TiO_2$  ile Zr karşılaştırma diyagramında da, Hazar ve Maden örneklerinden ortaça ve felsik arasında ve felsik bileşime uyan örnekler mevcuttur.

Sedimenter kayaların köken belirlenmesinde Sc, Th ve Co en uygun elementlerdir [18-26]. Jeokimyasal incelemeler sediman taşınması ve depolanması sırasında bu hareketsiz elementlerin provenans karakterizasyonu için önemli olduğunu göstermiştir [27-28-29-30-31]. Bu elementler anakayaç kimyasını yansıtır. La / Sc ve Th / Co oranları, üç örnek grubunun ortaça ağırlıkta, asidik kaya türlerine de yakın alandadır (Şekil 6). Daha önce belirtildiği üzere Elazığ Magmatik kayaları ve Maden Grubu'na ait inceleme alanına en yakın ve en güncel çalışma Tanyıldızı [14] tarafından yapılmış ve birimde yapılan petrografik incelemelerde Elazığ Magmatitleri ve Maden Grubu kayalarının benzer mineraloji, petrografi ve jeokimyasal bileşim sergilediği ve aynı köken magmadan geldiğini ve her iki birimde mevcut olan dasit, riyolit, bazalt, andezit, trakit gibi kayalardan bahsetmişlerdir.

Farklı tektonik ortamlardaki sedimenter kayaların jeokimyasal özellikleri değişkendir Cullers,[46]. İz elementleri ve çeşitli iki değişkenli ve çok değişkenli diyagramlar çoğunlukla paleotektonik konumların belirlenmesinde kullanılırlar [32, 33].

Hf elementine karşı La/Th diyagramı [34.] Hazar ve Maden Grubu örneklerinin benzerliği ve andezitik adayayı alanına düştüğünü göstermektedir (Şekil 7a).

La/Sc, Ti/Zr oranları [35] örneklerin okyanus adayayı ortamında depolanmış kayalardan türediğini göstermektedir (Şekil 7b).



**Şekil 5.** Hatunköy ve Şebken örneklerinin Nb/Y a karşı Zr/Ti [19] diyagramı. b. Hatunköy ve Şebken örnekleri iz elementlerinin PAAS'a normalize diyagramları. PAAS değerleri. [18]' den alınmıştır. c. Hatunköy ve Şebken örneklerinin a. TiO<sub>2</sub> – Zr diyagramı [20].

Şekil 5b'de Sc elementinin PAAS'a göre yüksek olması da yay oluşumuna işaret eden bir bulgudur. Bu bulgular daha önce yapılan çalışmalar ile uyum sağlamıştır. Hazar Grubu arazi incelemelerinde sedimanlarla arakatlı volkanitler mevcut değildir. Bununla birlikte Erdem [1], Çelik [3] tarafından da belirtildiği gibi Hazar Grubu'na ait alttaki Ceffan Formasyonu'na ait çakıltaşları Elazığ Magmatitleri'nin çakıllarını içermekte yani Hazar Grubu bileşim olarak Elazığ Magmatitleri'ni temsil etmektedir. Hazar Grubu sedimanları ile Maden Grubu sedimanlarının çok benzer olması, Elazığ Magmatitleri ile Maden Grubu'nun bileşim olarak benzerliğini ve her iki birimin aynı adayıya ait farklı zamanlarda

oluşmuş adayıyı ürünleri olduğunu yansıtmaktadır. Bu sonuç daha önceki çalışmalar ile uyum içindedir. Benzer şekilde Dönmez [37], Elazığ Magmatitleri'nin Neotetis'in güney kolunun supra-duction ile ilişkili Geç Kretasede oluşan ada yayının ortamında oluştuğunu ileri sürmüştür. Erdoğan [13] Ergani-Maden yöresinin Maden volkanik kayaçlarını, Hempton [7] Sivrice yöresindeki Maden Grubu kayaçlarını bu dalma-batma ile ilgili Maden baseninde gelişen ensimatik ve toleyitik bir ada yayı volkanizması ürünü olarak yorumlamıştır. Aynı şekilde Tanyıldızı [14]'de inceleme alanına yakın Elazığ Magmatitleri ve Maden Karmaşığı'nın oluşumunda volkanik yaydan bahsetmişlerdir. Ertürk ve Beyarslan [15] Anadolu levhası ile Arabistan levhası arasında Geç Triyas'ta Neotetis güney kolu açılmaya başladığını, Geç Kretase'de bu levhalar arasında bir dalma batma meydana gelmiş, bunun sonucunda Elazığ Magmatitleri ardından Maden Grubu oluştuğunu belirtmişlerdir.

## 4.2. Nadir toprak element jeokimyası

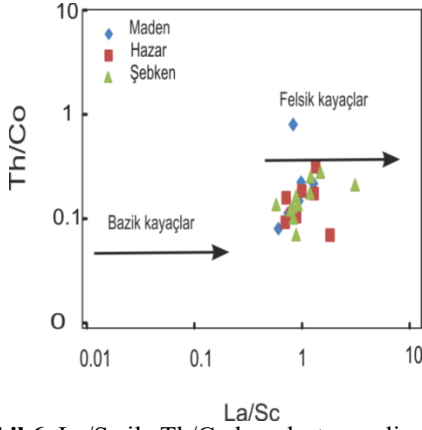
Her üç gruba ait nadir toprak elementleri (NTE) Tablo 3'de verilmiştir. Tabloda ortalamalardan görüldüğü gibi Hatunköy ve Şebken örnekleri benzer NTE bileşimine sahiptir. Hatunköy Hazar ve Maden Grubu örnekleri toplam NTE CaO ve Sr dışındaki major ve iz elementlerle pozitif korelasyon göstermektedir (Şekil 8a-b). Bu NTE 'lerin kil ve feldispatlara bağlı olduğunu yansıtır. Kil minerallerinin NTE leri içerdiği Miladowsky [38], Coppin [39] tarafından belirtilmiştir. Bu NTE 'lerin kil ve feldispatlara NTE ile CaO ve MgO arasındaki negatif korelasyonlar bu elementlerin karbonat artışına bağlı azaldığını gösterir.

LREE'lerin ve HREE'lerin zenginleştirilmesi veya tükenmesi  $(La / Yb)_N$  ve  $(Gd / Yb)_N$  oranı ile temsil edilirler (N: kondrite normalize edilmiştir [40]). Bu oranların ortalaması, her üç örnek grubunda benzerlik göstermektedir (Tablo 3).



**Tablo 3.** Hatunköy, Şebken örnekleri ve PAAS [18] NTE içerikleri.

	M-1	M2	M3	M4	M5	M6	ortalama	St. Sapma	H-1	H-2	H-3
La	11.9	22.7	22.7	19.4	15.2	13.9	17.63	4.63	15.9	17.6	16.6
Ce	22.2	39.9	43.3	40.1	31.7	33.9	35.18	7.68	30.9	34.1	34
Pr	2.5	5.75	4.83	4.93	4.09	4.64	4.46	1.10	3.59	4.08	4.15
Nd	9.2	24.3	19.3	23	19	21.1	19.32	5.37	15.2	17	16.6
Sm	2.51	5.17	4.55	4.76	4.31	5.34	4.44	1.02	3.46	3.7	3.66
Eu	0.51	1.17	1.17	1.57	1.22	1.53	1.20	0.38	0.79	0.9	1.1
Gd	1.97	4.6	4.64	5.16	4.86	6.05	4.55	1.37	3.21	3.32	4.03
Tb	0.34	0.78	0.7	0.87	0.8	0.98	0.75	0.22	0.52	0.53	0.68
Dy	2.01	4.28	4.09	5.5	4.77	5.7	4.39	1.33	3.01	3.07	4.23
Ho	0.45	0.89	0.82	1.24	1.06	1.32	0.96	0.32	0.64	0.7	0.91
Er	1.34	2.48	2.35	3.46	3.18	3.81	2.77	0.90	2.02	2.1	2.56
Tm	0.22	0.35	0.34	0.54	0.47	0.59	0.42	0.14	0.24	0.29	0.35
Yb	1.14	2.24	2.47	3.35	3.2	3.77	2.70	0.95	1.68	2.04	2.57
Lu	0.21	0.36	0.36	0.52	0.51	0.58	0.42	0.14	0.26	0.3	0.34
(La/Yb) <sub>N</sub>	7.72	7.49	6.79	4.28	3.51	2.73	5.42	1.99	7.00	6.38	4.77
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.43	1.70	1.55	1.27	1.26	1.33	1.42	0.16	1.58	1.35	1.30
Eu/Eu*	0.68	0.72	0.76	0.95	0.80	0.80	0.78	0.08	0.71	0.77	0.86
	H-4	H5	H6	H7	H8	H9	ortalama	St. Sapma	Şebken	PAAS	
La	16.6	14.7	7.5	5.1	12.1	19.5	13.96	4.82	18.34	38.2	
Ce	31.3	27.5	15.7	8.7	17.3	35	26.06	9.66	36.83	79.6	
Pr	3.71	3.41	1.76	1.09	2.66	4.67	3.24	1.18	4.46	8.83	
Nd	13.5	13.8	5.9	5	10.1	18.2	12.81	4.80	17.75	33.9	
Sm	2.92	2.72	1.47	0.9	2.25	3.96	2.78	1.06	3.67	5.55	
Eu	0.93	0.81	0.31	0.26	0.61	1.13	0.76	0.31	0.96	1.08	
Gd	3.31	3	1.73	1.19	2.41	4.18	2.93	0.99	3.59	4.66	
Tb	0.53	0.49	0.29	0.18	0.36	0.65	0.47	0.16	0.60	0.77	
Dy	3.12	2.81	1.88	1.05	2.14	3.87	2.80	0.98	3.46	4.68	
Ho	0.67	0.68	0.37	0.22	0.43	0.8	0.60	0.22	0.69	0.99	
Er	1.82	1.89	1.15	0.6	1.27	2.23	1.74	0.61	1.94	2.85	
Tm	0.29	0.29	0.15	0.09	0.19	0.35	0.25	0.09	0.30	0.4	
Yb	1.68	1.9	0.82	0.48	1.25	2.15	1.62	0.66	1.86	2.82	
Lu	0.29	0.28	0.14	0.09	0.16	0.35	0.25	0.09	0.28	43	
(La/Yb) <sub>N</sub>	7.30	5.72	6.76	7.85	7.15	6.70	6.05	1.15	7.43	9.2	
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.63	1.31	1.75	2.05	1.59	1.61	1.41	0.15	1...60	1..4	
Eu/Eu*	0.89	0.85	0.58	0.75	0.78	0.83	0.79	0.07	0.77	0.65	



Şekil 6. La/Sc ile Th/Co karşılaştırma diyagramı [26].

Bazik bileşimindeki kayaçlarda LREE / HREE oranları düşüktür ve Eu anomalileri mevcut değildir. Bununla birlikte daha silisli kayaçlar genelde daha yüksek LREE / HREE oranları ve daha yüksek negatif Eu anomalileri gösterirler [41].

İncelenen örnek guruplarının kondrite normalize edilmiş diyagramlarında PAAS değerleri ile karşılaştırıldığında örneklerin LREE /HREE oranları daha düşüktür. Bu Tablo 3'de PAAS'a göre daha düşük olan  $(La / Yb)_N$  ve  $(Gd / Yb)_N$  oranları ile de görülebilmektedir. Örneklerin PAAS kadar belirgin Eu anomalisine sahip olmaması da daha incelenen kayaçların kıtasal karakter sunmadığı ve az felsik olduğunu göstermektedir (Şekil 9).

Tanyıldızı [14] Hazar Grubu'na malzeme veren Elazığ Magmatitleri ve Maden Grubu volkanik kayaç örneklerinin magmanın zenginleşmiş bir manto kaynağından veya düşük dereceli ergimelerden oluşmuş eriyiklerden oluştuğunu ortaya koymuştur.

Örnek grubundaki  $Eu / Eu^*$  değerleri, Hatunköy Hazar Grubu örneklerinde 0.59-0.89, Maden Grubu örneklerinde 0.68-0.79'dir. Şebken örneklerinde ortalama 0.77 olup, bu da ortaç bir bileşime işaret eder. Bu değerlerin M1, M2 ve H6 örneklerinde nisbi olarak daha düşük değerler sunması bunların felsiğe daha yakın bileşim sergilemesinden kaynaklanmaktadır.

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada Hatunköy civarındaki Maastrichtiyen-Alt Eosen yaşlı Hazar Grubu'na ait gri-yeşil renkli çamurtaşları ile Orta Eosen yaşlı Maden Grubu'na ait volkanoklastitlerle ardalımalı kırmızı renkli çamurtaşlarından alınan örneklerin jeokimyası ortaya çıkarılmış, arazinin yakın kuzebatısındaki Şebken civarındaki Hazar Grubu ile de karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

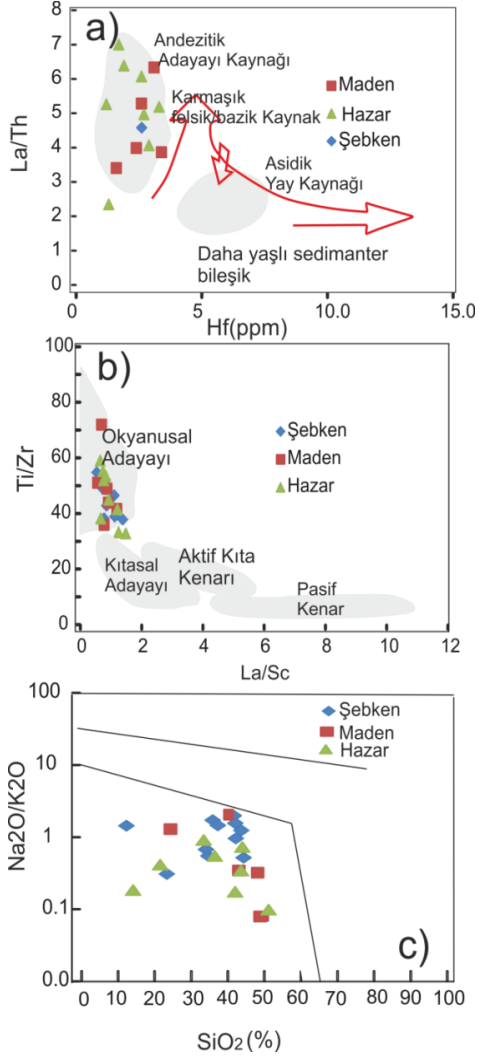
1.İnceleme alanındaki birimler yaşlıdan gence doğru; Geç Jura-Alt Kretase yaşlı Guleman Ofiyoliti, Senoniyen yaşlı Elazığ Magmatitleri, Maastrichtiyen-Alt Eosen yaşlı Hazar Grubu, Orta Eosen yaşlı Maden Grubu ve Pliyo-Kuvaterner, Kuvaterner yaşlı alüvyonlardır.

2.PAAS'a göre örneklerin  $Fe_2O_3$ , CaO, MgO, Mn ve  $Cr_2O_3$  içerikleri daha yüksek,  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$  içerikleri daha düşük olması örneklerin kıtasal karakter sunmadığı ve daha az felsik olduğunu göstermiştir.

3. $\log (SiO_2/Al_2O_3)$ ' e karşı  $\log (Fe_2O_3/K_2O)$  oranına göre her üç örnek grubunun çoğunluğu Fe' ce zengin şeyl, Hazar Grubu'na ait 2 örnek Fe kum alanına düşmektedir.

4. $\log (SiO_2/Al_2O_3)$ ' e karşı  $\log (Fe_2O_3/K_2O)$  oranına göre her üç örnek grubunun çoğunluğu Fe' ce zengin şeyl alanına düşmektedir. Nb/Y a karşı Zr/Ti diyagramda Hatunköy örneklerinden 1 Maden Grubu subalkali bazalt, 1 Hazar Grubu alkalın bazalt, 2 Hazar Grubu trakiandezit, 1 riyodasit/dasit alanına düşmekte olup genel olarak andezit alanına düşmüştür.

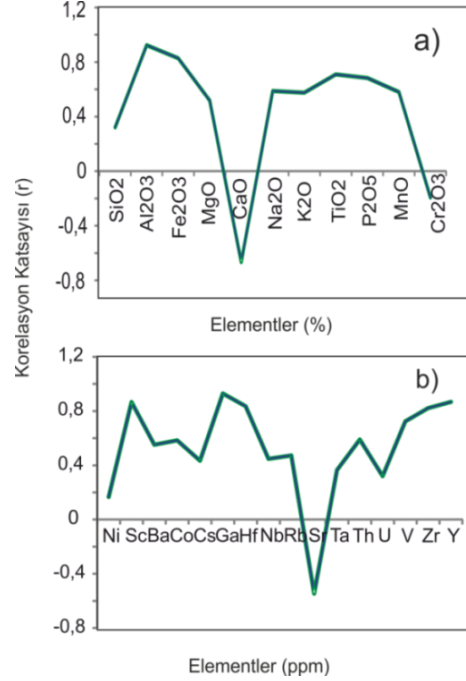
5.Hatunköy ve Şebken örnekleri için ortalama  $Al_2O_3 / TiO_2$  oranlarına göre Hazar Grubu örneklerinden H1, Maden Grubu örneklerinden 6.  $TiO_2$  ile Zr oranı ve karşılaştırma diyagramda da, Hazar ve Maden örneklerinden genellikle ortaç, ortaç ve felsik arasında bileşime uyan örnekler mevcuttur.



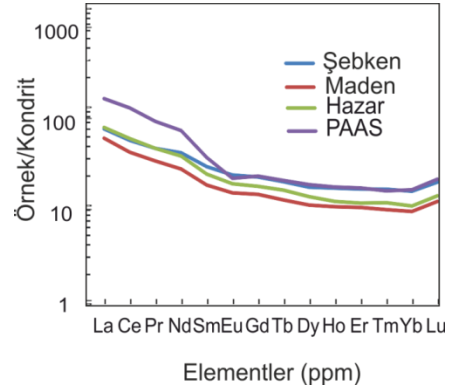
**Şekil 7.** Hatunköy ve Şebken örneklerinin .Hf elementine karşı La/Th diyagramı **b.** Si' a karşı Na/K diyagramı **c.** La/Sc, Ti/Zr oranları

La / Sc ve Th / Co oranlarına göre üç örnek grubu ortaça ağırlıkta, asidik kaya türlerine de yakın alandır. Bununla birlikte PAAS kadar belirgin Eu anomalisine sahip olmaması ve daha düşük LREE/HREE oranları bu örneklerin kıtasal karakter sunmadığı ve daha az felsik olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak Hatunköy Hazar Gurubu, Maden Gurubu ve Şebken'e ait Hazar Grubu örnekleri major, iz ve NTE 'ler bakımından

belirgin oranda benzerlik göstermiştir. Bu durumda gerek kaynak kayaç bileşimi, gerek ise tektonik ortam özellikleri bakımından Elazığ Magmatitleri'ne ait volkanitler



**Şekil 8.** Hatunköy örneklerine ait  $\Sigma$ NTE ile a. major oksit, b. İz elementler arasındaki korelasyon katsayıları.



**Şekil 9.** Hatunköy ve Şebken örneklerinin kondrite normalize edilmiş multielement diyagramları (Kondrit normalize değerler Sun ve McDonough [40]' dan).

ve Maden Grubu'na ait sedimanların aynı özelliklere sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bu da daha önce inceleme alanı çevresinde yapılan incelemelerle uyum içersindedir.

## 7. Katkı Belirtme

Bu çalışma MF. nolu Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (FÜBAP) MF. 13. 25 nolu proje tarafından desteklenmiştir. Makalenin incelenmesi sırasında yapmış oldukları katkılarından dolayı hakemlere teşekkürlerimizi sunarız.

## 8. Kaynaklar

1. Erdem, E. (1987). Petrological investigation of magmatic rocks around Elazığ Kartaldere-Göları (NE of Hazar Lake). Master Thesis, Fırat Univ., 1-72.
2. Kaya, A. (1993). Gezin-Maden (Elazığ) çevresinde jeolojik araştırmalar. Yüksek Lisans Tezi, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Çelik, H. (2003). Mastar Dağı (Elazığ GD' su) çevresinin stratigrafik ve tektonik özellikleri. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
3. Akkoca, D.B., Kürüm S., Huff, D. (2013). W. W. Geochemistry of volcanogenic clayey marine sediments from the Hazar-Maden Basın (Eastern Turkey), *Geologica Carpathica*, **64** (6):467-482.
4. Bingöl, A.F. (1988). Petrographical and petrological features of the intrusive rocks of Yüksekova Complex in the Elazığ region (Eastern Taurus-Turkey). *Journal of Fırat University*, **3**(2):1-17.
5. Yazgan ve Chessex, (1991). Geology and tectonic evolution of the Southeastern Taurides in the Region of Malatya. *Turkish Association of Petroleum Geologists*, **3**:1-42.
6. Hempton, M. (1984). "Results of detailed mapping near lake Hazar Eastern Taurus mountains" in Tekeli, O. and Göncüoğlu, M.C. (eds) *Geology of the Taurus Belt, Proceedings of International Symposium. Mineral research and Exploration Institute of Turkey (MTA), Ankara*, 223-228.
7. Robertson A. H. F. (2002). Overview of the genesis and emplacement of Mesozoic ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan region. *Lithos*, **65**: 1-67.
8. Rigo de Righi, M. ve Cortesini, A. (1964). Gravity tectonics in foothills structure belt of southeast Turkey, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull*, **48**(12): 1911-1937.
9. Yazgan, E. (1984). "Geodynamics Evolution of the Eastern Taurus Region" in Tekeli, O. and Göncüoğlu, M.C. (eds.), *Geology of the Taurus Belt; International Symposium Proceedings, 199-208, Mineral research and Exploration Institute of Turkey (MTA), Ankara*.
10. MTA 1/500 000 Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2002, 1:500000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Diyarbakır Paftası, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara.
11. Yiğitbaş, E., Yılmaz, Y. (1996). New evidence and solution to the Maden complex controversy of the the Southeast Anatolian orogenic belt (Turkey). *International Geology Review*, **38**(9): 818-831.
12. Erdoğan, B. (1982). Ergani-Maden Yöresindeki Güneydoğu Anadolu Ofiyolit kuşağının jeolojisi ve volkanik kayaçları. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, **25**: 49-50.
13. Tanyıldızı, Ö. (2014). Elazığ Güneyi Yemişlik-Dereboynu köyleri arasındaki magmatik kayaçların petrografik ve jeokimyasal özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 81s.
14. Ertürk, M.A. and Beyarslan, M. (2015). Geochemical and Geotectonical Features of maden Complex (Eastern Taurus-Turkey), 4th Annual International Conference on Geological and earth Sciences, sayfa 62.
15. Ma, L., Jin, L. ve Brantley S.L. (2011). Geochemical behaviors of different element groups during shale weathering at the Susquehanna/Shale Hills Critical Zone Observatory. *Applied Geochemistry*, **26**: 89-93.
16. Herron, M. (1988). Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Research*, **58**:820-829.
17. Taylor, S.R., McLennan, S.M. (1985). The Continental Crust; Its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell, UK, 328 p.
18. Winchester, J.A. and P.A. Floyd, (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, **20**: 325-343.
19. Hayashi, K.I., Fujisawa, H., Holland, H.D., Ohmoto, H. (1997). Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **61**: 4115-4137.
20. Yıldız, A., Kuşcu, M., (2006). Başören (Kütahya) bentonit yataklarının jeokimyasal özellikleri, *Kibited*, **1**(1): 27-41.
21. Fanti, F. (2009). Bentonite chemical features as proxy of late Cretaceous provenance changes: A case

study from the Western Interior Basin of Canada, *Sedimentary Geology*, **217**:112–127.

**22.** Özdamar, Ş., Ece, Ö.İ., Uz, B., (2014). Element mobility during the formation of the Uzunisa-Ordu bentonite, NE Turkey, and potential applications, *Clay Minerals*, **49(5)**: 609-633.

**23.** Salomon, W. ve Forstner, U. (1984). *Metals in the hydrocycle*, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 349 pp.

**24.** Ali, S., Stattegger, K., Garbe-Schönberg, D., Frank, M., Kraft, S., Kuhn, W. (2014). The provenance of Cretaceous to Quaternary sediments in the Tarfaya basin, SW Morocco: Evidence from trace element geochemistry and radiogenic Nd–Sr isotopes, *Journal of African Earth Sciences*, **90**: 64-76.

**25.** Bhatia, M.R., Taylor, S.R. (1981). Trace-element geochemistry and sedimentary provinces: a study from the Tasman geosyncline, Australia. *Chemical Geology*, **33**:115–125.

**26.** Saydam Eker, Ç., Korkmaz S. (2011). Mineralogy and whole Rock geochemistry of Late Cretaceous sandstones from the Eastern Pontides (NE Turkey). *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie-Abhandlungen*, **188**: 235-256.

**27.** Saydam Eker, Ç. (2012). Petrography and geochemistry of Eocene sandstones from Eastern Pontides (NE Turkey): Implications for source area weathering, provenance and tectonic setting. *Geochemistry International*, **50( 8)**:683–701.

**28.** Yalçın, H., Bozkaya, Ö. (1995a). Sepiolite-palygorskite from the Hekimhan region (Turkey). *Clays and Clay Minerals*, **43(6)**: 705-717.

**29.** Yalçın, H., Bozkaya, Ö. (1995b). Kangal-Çetinkaya alt baseni (Sivas baseni) gölssel palygorskitlerinin mineralojisi ve jeokimyası. VII. Ulusal Kil Sempozyumu, MTA, Ankara, 27-30.

**30.** Bozkaya, O., Yalçın, H., Kozlu, H. (2011). Clay mineralogy of the Paleozoic–Lower Mesozoic sedimentary sequence from the northern part of the Arabian Platform, Hazro (Diyarbakır), Southeast Anatolia”. *Geologica Carpathica*, **62**: 489-500.

**31.** Cullers, R.L. (2000). The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: Implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos*, **51**: 181–203.

**32.** Roser B.P, Korsch R.J. (1988). Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, **67**: 119-139.

**33.** Floyd, P.A., Leveridge, B.E., (1987). Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *Journal of the Geological Society. London* **144**: 531-542

**34.** Bhatia M. R., Crook K. A. W. (1986). Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting of sedimentary basins. *Contrib. Mineral.Petrol*, **92**: 181–193.

**35.** Mohamed, F.H., Hassanen, M.A. (1996). Geochemical evolution of arc-related mafic plutonism in the Umm Naggat district, Eastern Desert of Egypt. *Journal of African Earth Science*, **22(3)**: 269-283.

**36.** Dönmez, C. (2006). Geology, petrography and geochemistry of the Elazığ magmatics outcropping between Soğanlı-Uyandık (Elazığ)], Çukurova Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi. .Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

**37.** Miladowsky, A.E., Zalasiewicz, J.A. (1991). Redistribution of rare-earth elements during diagenesis of turbidite/hemipelagite mudrock sequences of Llandovery age from central Wales. *Geological Society Special Publication*, **57**: 101-124.

**38.** Coppin, F., Berger, G., Bauer, A., Castet, S., Loubet, M. (2002). Sorption of lanthanides on smectite and kaolinite. *Chemical Geology*, **182**: 57-68.

**39.** Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989). “Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes” in: Saunders, A.D., Norry, M.J., Eds., *Magmatism in the Ocean Basins*, Geological Society, London, Special Publications, **42**: 313-345.

**40.** Cullers, R. L. and Graf, J. (1983). Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: intermediate and silicic rocks, Korea petrogenesis. *Rare-Earth Geochemistry*, Elsevier, Amsterdam, 275–312pp.



## Kırık Rotor Çubuğu Arızası için Bulanık Otomata Yöntemi Kullanılarak Gerçek Zamanlı Arıza

Orhan Yaman<sup>1</sup>, Ebru Karaköse<sup>2</sup>, İlhan Aydın<sup>3</sup>, Mehmet Karaköse<sup>4</sup>, Erhan Akın<sup>5</sup>

<sup>1,3,4,5</sup>Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ 23119

<sup>2</sup>Sivil Havacılık Yüksek Okulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ 23119

<sup>1</sup>orhanyaman@firat.edu.tr

(Geliş/Received:20.11.2017; Kabul/Accepted:10.07.2018)

### Özet

Modern endüstriyel sistemlerde üretimi sağlayan bileşenlerin durumunun izlenmesi ve erken arıza teşhisi önemli konulardan biridir. Bu sistemlerde iş gücünün büyük bir kısmını asenkron motorlar karşılamaktadır. Kırık rotor çubuğu arızaları asenkron motorlarda oluşan önemli arızalardan biridir. Bu arıza türü için gerçekleştirilen yöntemlerin çoğu çevrimdışı olarak uygulanmakta olup uzman bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada kırık rotor çubuğu arızalarının teşhisi için gerçek zamanlı bir bulanık otomata yöntemi sunulmuştur. Önerilen yöntem arıza teşhisi için tek faz motor akımını kullanmaktadır. Elde edilen akım sinyalleri on periyotluk pencerelere bölünmekte ve bu pencerelerden Hilbert dönüşümü kullanılarak yeni özellik sinyali çıkarılmaktadır. Bu özellik sinyalinin sembol dizisi üretilip ardışık pencereler arasındaki entropi değeri entropi ağacı oluşturularak hesaplanmaktadır. Bu değer, sağlam ve arızalı motor durumlarını birbirinden ayırt etmek için kullanılmaktadır. Entropi değerinin izlenerek arızaların belirlenmesi için bulanık otomatadan faydalanılmaktadır. Bulanık otomata her bir sağlam ve arızalı durum için bir son duruma sahiptir. Bulanık otomata herhangi bir son duruma ulaşırsa motor durumu gösterilmektedir. Önerilen yöntem yüksüz durumda kırık rotor çubuğu arızalarını teşhis etmektedir. Yöntemin doğruluğu 0.37 kW'lık üç fazlı bir asenkron motordan deneysel olarak alınan veriler kullanılarak ispatlanmıştır

**Anahtar kelimeler:** Bulanık Otomata, Arıza Teşhisi, Hilbert Dönüşümü, Asenkron Motor.

## Real Time Fault Detection Using Fuzzy Automata Method for Broken Rotor Bar Faults

### Abstract

The monitoring of the components that insures the production in modern industrial systems and fault diagnosis are one of important issues. In these systems, induction motors perform a big part of the work power. Broken rotor bars are one of important faults occurred in induction motors. The most of methods that implemented for this fault type are applied offline and they need the expert information. In this study, a real time fuzzy automata based method is presented for diagnosis of broken rotor bars. The proposed method uses one phase current signal for fault diagnosis. The obtained current signals are divided to windows of ten periods and the new feature signal is extracted using Hilbert transform. The symbol series of this feature signal is generated and the information entropy between two consecutive windows is calculated by constructing entropy tree. This value is used to separate the conditions of healthy and faulty motors. Fuzzy automata are utilized to detect the faults by monitoring entropy value. Fuzzy automata have a final state for each motor condition. If fuzzy automata reach any final state, the state of motor is displayed. The proposed method diagnoses the broken rotor bar faults under no load condition. The accuracy of the method is proved by experimental data taken from a 0.37 kW induction motor.

**Keywords:** Fuzzy Automata, Fault Diagnosis, Hilbert Transform, Induction Motor

### 1. Giriş

Karmaşık sistemlerde arıza teşhisi ve tespiti hem endüstriyel hem de biyomedikal uygulamalar için önemli rol oynayan bir araştırma alanıdır. Asenkron motorlar elektrik enerjisinin mekanik

enerjiye dönüştürülmesi için endüstride en çok tercih edilen makinalardandır [1]. Bu motorların en önemli avantajları ucuz, sağlam ve güvenilir olup basit bir yapıya sahip olmalarıdır. Bu tür motorlar için gerçekleştirilen arıza teşhis yöntemleri diğer elektrik motorları için de

kullanılabilmektedir [2]. Asenkron motorların arıza teşhisi ve tahmini için durum izlemesi bu makinaların endüstriyel süreçlerin devamlılığını sağlamalarından dolayı önemlidir. Erken aşamada tespit edilen arızalar süreçlerin aksama süresini azaltır. İdeal bir arıza teşhis sistemi motordan gerekli minimum ölçümleri almalı ve en kısa sürede arıza türünü belirlemelidir. Asenkron motorlarda oluşan arızalar içerisinde kırık rotor çubuğu arızaları %10'luk bir orana sahiptir [3].

Genel arıza teşhis yöntemleri model tabanlı ve sinyal tabanlı olmak üzere iki şekilde düşünülebilir. Model tabanlı arıza teşhisi motorun matematiksel modeline dayalıdır. Sinyal tabanlı arıza teşhisi ise motordan akım, gerilim, titreşim ve hız gibi sinyallerin ölçülmesi ve bu sinyallerden elde edilen özelliklerin motor durumunun belirlenmesinde kullanımını gerektirir. Elde edilen özellikler yapay sinir ağları, yapay bağışık sistemler, sinirsel bulanık sistemler gibi akıllı hesaplama teknikleri ile eğitilerek arızalar belirlenir. Kırık rotor çubuğu arızalarının teşhisi için motor akım imza analizi birçok çalışmada kullanılmıştır [1,4,5]. Motor akım imza analizi yöntemi motor akımının frekans spektrumunu fourier dönüşümü ile elde edilerek yan bant bileşenlerinin incelenmesine dayalıdır. Fakat motor düşük yükte çalışırken yan bant frekansları hat frekansına çok yakın olduğundan bu durumlarda yöntem kötü sonuçlar verir. Düşük yüklerde kırık rotor çubuğu arızalarını teşhis etmek için başlama akımına ayrık dalgacık dönüşümü uygulanmıştır [6-8]. Ayrık dalgacık dönüşümü yöntemi iyi sonuçlar vermesine rağmen arıza teşhisi için her defasında motorun yeniden başlatılmasına ihtiyaç duyar. Ayrıca evirici ile beslenen motorlarda bu yöntem iyi sonuçlar vermez. Kırık rotor çubuğu arızasını faz uzayında tespit etmek için akıllı hesaplama tabanlı teşhis yöntemleri sunulmuştur [9-11]. Bütün bu arıza teşhis yöntemleri sinyallerin motordan alınması ve bilgisayar ortamında teşhisin yapılmasına dayalıdır. Bu şekilde çalışan yöntemler gerçek zamanlı arıza teşhisi için uygun değildir. Dalgacık ve Fourier dönüşümü gibi yöntemlerin iyi sonuç verebilmesi için verilerin yüksek çözünürlükte alınması gereklidir. Arıza

teşhisi ile ilgili birçok çalışma yapılmasına rağmen halen şu eksiklikler bulunmaktadır [12]:

- Çalışma ve yük durumlarına bağımlı olma,
- Zamanla değişen şartlarda güvenilir arıza teşhisinin yapılamaması,
- Bütün arıza türleri için tek bir teşhis yönteminin geliştirilememesi.

Ayrık olay sistemleri belirsizliğin olduğu problemlerin çözümünde oldukça kullanışlıdır. Ayrık olay sistemleri birçok mühendislik probleminin çözümünde kullanılmasına rağmen, arıza teşhis problemleri için uygun değildir. Çünkü arıza teşhisinde sistemin durumu ile ilgili keskin çıkarımlar yapılamaz. Oluşan arızaların belirli seviyeleri olabilir. Örneğin asenkron motorda mil yatağının tamamen bozulması daha önceden oluşan sürtünme arızalarına bağlı olabilir. Dolayısıyla motor direkt olarak sağlam durumdan mil yatağı arızasına geçmez. Bu problemlerin çözümü için bulanık geçiş ve durumlar kullanılabilir. Bulanık geçiş ve durumların göz önüne alındığı otomata bulanık otomata olarak isimlendirilir [13]. Bulanık otomatada girişler  $[0,1]$  aralığında üyelik dereceleri ile bulanıklaştırılır.

Bu çalışmada kırık rotor çubuğu arızalarının gerçek zamanlı teşhisi için bulanık otomata tabanlı yeni bir yöntem sunulmaktadır. Yüksüz durumda çalışan bir motor düzenli bir şekilde akım çektiği için kırık rotor çubuğu arızasının tespiti oldukça zordur. Bu çalışmada, yüksüz durumdaki motorun kırık rotor çubuğu arızası tespit edilebildiği için önerilen yöntem özgündür. Yöntem bu amaçla tek faz motor akımını on periyotluk kısa pencerelelere bölerek Hilbert dönüşümü uygulamakta ve elde edilen sinyali sembol serisine dönüştürerek ayırklaştırmaktadır. Elde edilen serinin sembol ağacı oluşturulup entropi hesabı yapılmakta ve bu değer bulanık otomata ile değerlendirilerek arızalar teşhis edilmektedir.

## 2. Sonlu Durum Otomatalar ve Ayrık Olay Sistemleri

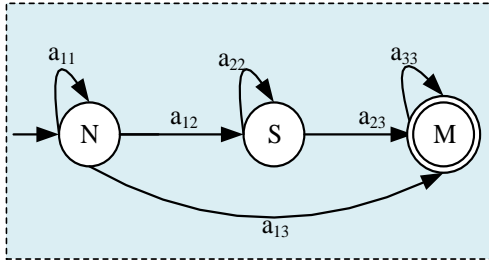
Otomata ayrık olay sistemlerin dinamiklerini modellemek için kullanılan bir yöntemdir. Dinamik sistemler genel olarak fark veya



diferansiyel denklemler ile tam olarak gösterilemeyen ve eş zamanlı olarak gerçekleşmeyen olayların oluşması ile durumu değişen sistemlerdir [13]. Genelde bir ayrık olay sistemi sonlu otomata ile ifade edilir. Sonlu bir otomata ise beş parametreye sahiptir [14]. Bu parametreler denklem (1)'de verilmiştir

$$M = \{\Phi, B, \delta, S, F\} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde  $\Phi$  ayrık durumların kümesini ve B değişkeni durumlar arasındaki geçişlerin kümesini gösterir. Denklemdeki  $\delta$  değeri geçiş haritalanmasını, S başlangıç durumunu ve F ise son durumu gösterir. Bu modelde her bir durum bir olayın oluşmasını gösterir. Şekil 1'de otomata ile ilgili bir örnek verilmiştir.



Şekil 1. Otomata ile ayrık bir olay sisteminin modellenmesi

Şekil 1 bir asenkron motorun durumunu ifade etmek için kullanılabilir. Burada N normal çalışan motoru, S mil yatağı sürtünme arızasını ve M ise mil yatağının tamamen bozulması durumunu göstermek için kullanılabilir. Bu otomata sisteminde başlangıç durumunun N olduğunu kabul edersek diğer parametreler denklem (2)'de ki şekilde ifade edilebilir.

$$\Phi = \{N, S, M\} \quad (2)$$

$$B = \{a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{22}, a_{23}, a_{33}\}$$

Bu otomata için başlangıç durumu  $N=[1 \ 0 \ 0]$  ile gösterilebilir. Herhangi bir zamanda sistem üç durumdan birinde olabilir. Otomatanın farklı durumları arasındaki geçişler herhangi bir olayın gerçekleşmesine bağlıdır [13]. Bir olay genel

olarak geçiş matrisi ile ifade edilir. Denklem (3)'te  $a_{11}$  ve  $a_{12}$  geçişleri için matrisler verilmiştir.

$$a_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, a_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

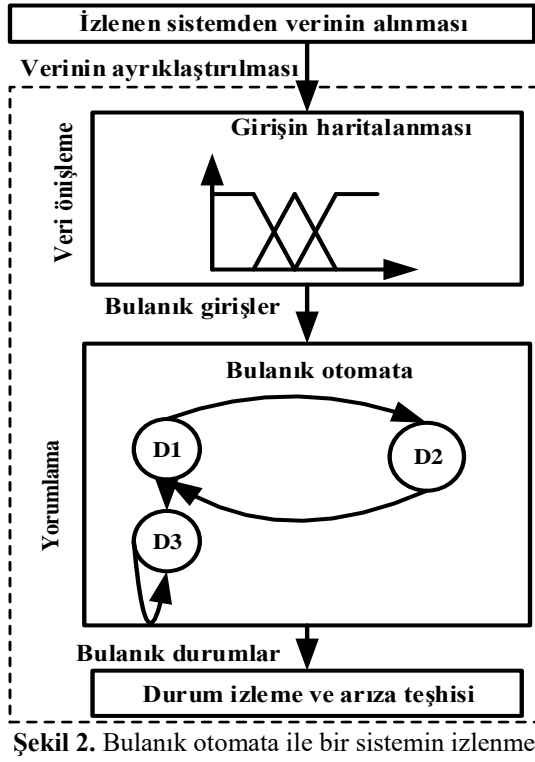
Eğer sistem başlangıçta  $S=[0 \ 1 \ 0]$  durumunda ise ve  $a_{23}$  geçişi olursa bir sonraki durumu denklem (4)'te ki gibi hesaplanır.

$$[0 \ 1 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0 \ 0 \ 1] \quad (4)$$

Ayrık olay sistemleri birçok mühendislik probleminin çözümünde kullanılmasına rağmen bazı problemlerde keskin geçişler mümkün olmamaktadır [15]. Şekil 1'de bir mil yatağı tamamen arızalanmadan önce bu bileşende oluşan sürtünmeler mil yatağının arızalanmasını hızlandırır. Dolayısıyla  $a_{13}$  geçişi aslında tespit edilemeyen bir olay olarak ifade edilir. Ayrıca arıza teşhis probleminde çoğu zaman bir bileşen ile ilgili arızanın şiddeti de bilinmek istenir. Ayrık zamanlı sistemlerde bir sistemin durumu hakkında belirsizliğin ölçümü ve oluşan herhangi bir arızanın teşhis edilebilirliği iki önemli parametredir.

### 3. Bulanık Otomata

Her bir durumu ve durumlar arası geçişi 0 veya 1 ile ifade edilen sonlu otomata bazı mühendislik problemleri için uygun değildir. Özellikle durumlar arasında belirsizliğin olduğu sistemlerde sonlu otomata doğru sonuç vermeyebilirler. Bu tür problemler için bulanık durumlar ve geçişler tanımlanmıştır. Keskin geçişler yerine kullanılan ve  $[0, 1]$  aralığında değer alan bu durum ve geçişler bulanık otomata olarak isimlendirilir [16]. Bulanık otomatada sistem farklı üyelik dereceleri ile aynı anda birkaç durumda olabilir. Şekil 2'de bulanık otomata ile problem çözüm adımları verilmiştir.



Şekil 2. Bulanık otomata ile bir sistemin izlenmesi

Şekil 2’de görüldüğü gibi ilk olarak sistemden alınan verilerin ayrıklaştırılması gerekmektedir. Daha sonra bulanık üyelik fonksiyonları ile girişler bulanıklaştırılır. Bu aşama veri ön işleme olarak da isimlendirilir. Sonraki aşamada bulanık giriş otomataya verilir ve sistemin durumu izlenerek arıza teşhisi yapılır. Şekil 1’deki örnek göz önüne alındığında bir motorun durumu herhangi bir t anında 0.7 üyelik derecesi ile “Normal”, 0.2 üyelik derecesi ile “Sürtünme” durumu ve 0.1 üyelik derecesi ile “Mil yatağı” arızası durumunda olabilir. Bu durum denklem (5)’te ki gibi gösterilebilir.

$$S = [0.7 \quad 0.2 \quad 0.1] \quad (5)$$

Durumlar arası geçiş matrisi de sıfır ile bir arasında değer alan elemanlardan oluşur. Herhangi bir anda  $a_{12}$  geçiş matrisi denklem (6)’daki gibi gösterilebilir.

$$a_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Denklem (6)’daki geçiş matrisine göre N durumundan S durumuna geçiş denklem (7)’deki gibi hesaplanabilir.

$$[0.7 \quad 0.2 \quad 0.1] \times \begin{bmatrix} 0 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0 \quad 0.49 \quad 0] \quad (7)$$

Bulanık otomatanın genel tanımlanması aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

Bulanık durumlar  $\bar{\Phi}_f$  ile ifade edilir. Her bir durumun üyelik derecesi  $\mu(\bar{\Phi}_f)$   $[0, 1]$  aralığında bir değerdir.

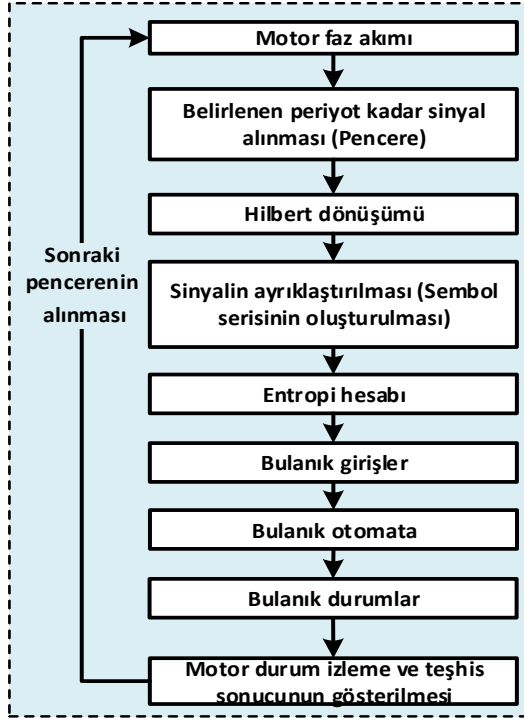
- Giriş kümesinin her bir elemanı da  $[0, 1]$  aralığında bir üyelik derecesine sahip olup  $\mu(a_{ij})$  ile gösterilir.
- Durumlar arası geçişler  $\mu(\bar{\delta}_f)$  ile ifade edilir. Geçiş üyelik derecesi iki durum arasında gerçekleşen bir olay ile ifade edilir.
- Başlangıç ve son durum sonlu durum otomataya benzer biçimde ifade edilir.

Bulanık otomata dinamik bir sistemdeki çıkış ile referans bir sinyalin benzerliğini ölçmek için kullanılabilir [17-20]. Bu özellik sayesinde sistemden ölçülen ayrık sinyallerin bir referans sinyale göre değişimi arıza tespiti için uygundur. Bulanık otomatada ölçüm hatası ile ilgili eşik değer, her bir durum ve geçiş üyelik fonksiyonu bir uzman tarafından belirlenir.

#### 4. Bulanık Otomata Tabanlı Arıza Teşhisi

Bu çalışmada asenkron motorlarda arıza teşhisi için bulanık otomata tabanlı bir yöntem sunulmuştur. Yöntem asenkron motorlarda oluşan kırık rotor çubuğu arızalarını belirlemek için stator akımına ihtiyaç duymaktadır. Stator akımından Hilbert dönüşümü aracılığıyla yeni özellik sinyali çıkarılmaktadır. Daha sonra bu

sinyalin sembol serisi oluşturularak ayrıklaştırma işlemi yapılmaktadır. Serinin entropi ağacı oluşturulmakta ve ardışık pencereler arası hesaplanan entropi değeri bulanık otomatanın girişine verilerek arıza teşhisi yapılmaktadır. Önerilen arıza teşhis yönteminin blok diyagramı Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Önerilen yöntemin blok diyagramı

Şekil 3'teki blok diyagramına göre motor akımının her defasında belli sayıda periyodu sisteme giriş olarak verilmektedir. Bu durum algılamada pencere olarak ifade edilmiştir. Her bir pencerenin boyutu denklem (8)'e göre hesaplanmaktadır.

$$w = f_s \frac{1}{f_h} n \quad (8)$$

Bu denklemde  $f_s$  örnekleme oranını,  $f_h$  hat frekansını ve  $n$  ise periyot sayısını gösterir. Hilbert dönüşümü herhangi bir sinyal ile o sinyalin 90 derece kaydırılması ile elde edilir. Üretilen sinyal genelde karmaşık iki bileşenden

oluşur. Birinci bileşen orijinal sinyali ikinci bileşen ise Hilbert dönüşümünü ifade eder. Bir sinyalin Hilbert dönüşümü denklem (9)'a göre hesaplanır.

$$H(I(t)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{I(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (9)$$

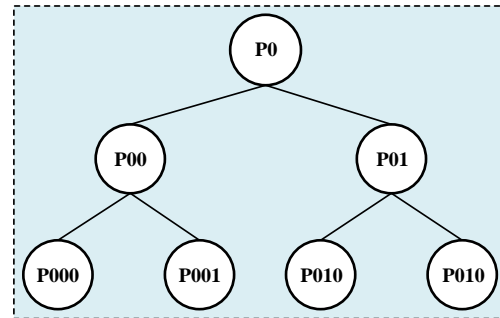
Ayrık zamanlı sinyaller için denklem (9) aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir.

$$H(I(t)) = \frac{1}{\pi} * I(t) \quad (10)$$

Hilbert dönüşümü bir sinyalin anlık büyüklüğünü hesaplamak için oldukça kullanışlıdır. Bu çalışmada denklem (10)'daki Hilbert dönüşümünün mutlak değeri özellik sinyali olarak kullanılmıştır. Yöntemin sonraki aşaması elde edilen özellik sinyalinin sıfır ve birlerden oluşan sembol serisine dönüştürülmesidir. Bu işlem denklem (11)'de gösterilmiştir.

$$S(t) = \begin{cases} 1, & H(t) \geq \text{medyan}(H(t)) \\ 0, & H(t) < \text{medyan}(H(t)) \end{cases}, t = 1, \dots, n \quad (11)$$

Denklem (11)'de sinyalin medyana göre değişimi sembol serisi olarak ifade edilmiştir. Bu sembol serisi oluşturulduktan sonra entropi hesabı için sembol ağacının oluşturulması gerekir. Üç seviyeli sembol ağacı Şekil 4'te verilmiştir.



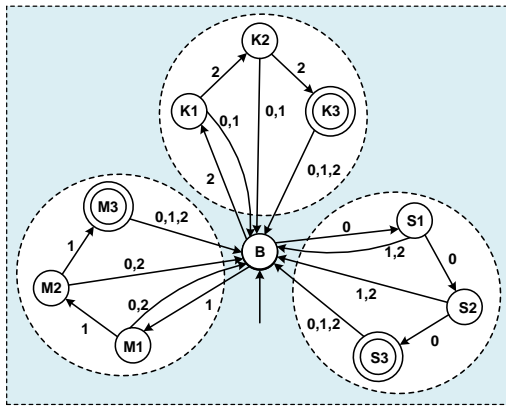
Şekil 4. Üç seviyeli sembol ağacı

Şekil 4’teki sembol ağacı her bir düğümde o seriye ait entropi oranını vermektedir. Sembol ağacında örneğin P00 düğümü elde edilen sembol serisindeki “00”ların sayısının toplam dizi uzunluğuna oranıdır. Ağaçtaki seviye arttıkça algoritmanın karmaşıklığı artar. Buna karşın farklı durumları birbirinden ayırt etmek daha kolay olur. Ağaçtaki bilgi entropisi denklem (12)’ye göre hesaplanmaktadır.

$$H_s = -\frac{1}{\log n} \sum_m P_m \log P_m \quad (12)$$

$$H = -\frac{1}{\log n} \left( \sum_{i=1}^L \left( \sum_{monceki} \frac{P_{monceki-1}}{w} \log \frac{P_{monceki+1}}{w} + \sum_{myeni} \frac{P_{myeni+1}}{w} \log \frac{P_{myeni+1}}{w} \right) + \sum_{mara} P_{mara} \log P_{mara} \right) \quad (13)$$

Denklem (13)’te monceki, mara ve myeni sırasıyla önceki pencere, ara pencere ve yeni pencereyi ifade eder. Bu denklemde L entropi ağacının seviyesini gösterir. Kayan pencereler arasındaki entropi hesabı bulanıklaştırma işlemine tabi tutularak bulanık otomatanın durumları arasında geçiş sağlanacaktır. Kayan ardışık pencereler arasındaki bilgi entropisi her adımda hesaplanarak otomatanın girişine verilmektedir. Otomata gelen girişlere göre durumunu sürekli günceller. Bu çalışmada önerilen bulanık otomata yapısı Şekil 5’te gösterilmiştir.



Denklem (12)’de sembol serisinin uzunluğu n ile gösterilmiştir. Denklemdeki m indisi sembol serisinde olasılığı (Pm) sıfırdan farklı olanların indisini gösterir. Gerçek zamanlı izleme için her defasında bir pencerecik akım sinyali alınmakta ve sonraki aşamada bir adım kaydırma işlemi yapılarak sonraki pencere elde edilmektedir. Bir önceki pencere ile sonraki pencere arasındaki entropi hesabı arıza indeksi olarak kullanılacaktır. Bu hesaplama denklem (13)’e göre yapılmaktadır.

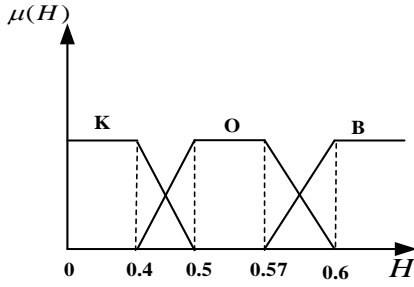
Şekil 5. Önerilen bulanık otomata

Şekil 5’teki bulanık otomatada B başlangıç durumunu göstermektedir. Bu durumdan diğer durumlara geçiş için entropi değerinin üyelik derecesi kullanılmaktadır. Bu geçişler ve temsil ettikleri durumlar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Önerilen yöntemin çalışma performansı

Geçiş	Durum
0	Sağlam durum
1	Bir kırık rotor çubuğu arızası
2	Birden fazla kırık rotor çubuğu arızası

Otomatada S1, S2, S3 durumlarına gelen verinin bir eşik değerinin altında olması durumunda geçilmektedir. Aynı şekilde K ile ifade edilen durumlara bir kırık rotor çubuğu arızasında, M ile ilgili durumlara ise birden çok kırık rotor çubuğu arızasında geçilmektedir. Otomata her bir sağlam ve arızalı durum için son duruma sahiptir. Gelen girişleri modellemek için Şekil 6’daki gibi üyelik fonksiyonları tanımlanmıştır.



Şekil 6. Geçişler için kullanılan üyelik fonksiyonu

Şekil 6’da verilen üyelik fonksiyonu uzman bilgisine göre oluşturulmuştur. Şekil 6’da K küçük üyelik fonksiyonunu, O orta üyelik fonksiyonunu ve B ise büyük üyelik fonksiyonunu göstermektedir. Elde edilen entropi sonucunun her bir üyelik fonksiyonu için üyelik değeri hesaplanarak geçiş yapılacak durum hesaplanmalıdır. Bu amaçla denklem (14) kullanılmaktadır.

$$\mu_g = \max(\mu_H(K), \mu_H(O), \mu_H(B)) \quad (14)$$

Yukarıdaki denklemde geçiş üyelik fonksiyonu maksimum üyeliğe göre hesaplandıktan sonra eğer bu değer K üyelik fonksiyonuna ait ise 0 geçişi, O üyelik fonksiyonuna ait ise 1 geçişi, aksi halde 2 geçişi olmaktadır.

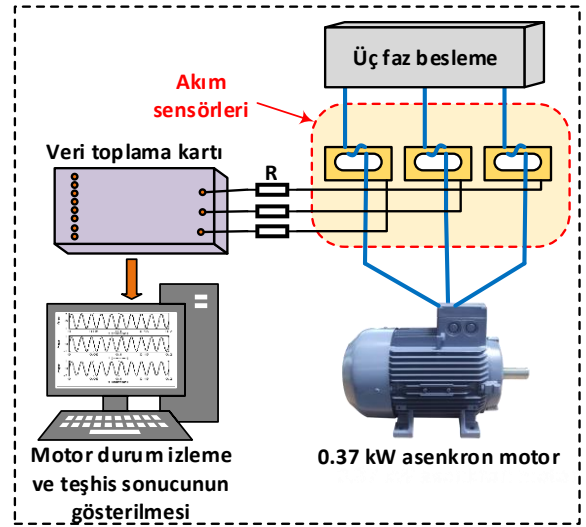
## 5. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada önerilen yöntemin uygulanması için gerçek bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Deney düzeneğinde sağlam ve arızalı asenkron motorlar kullanılarak veriler alınmıştır. Bu çalışmada üç fazlı asenkron motorlar kullanılmıştır. Kullanılan asenkron motorların Gücü 0.37 kw, tam yük akımı 1.2 A, besleme frekansı 50 Hz, kutup sayısı 4, rotor çubuklarının sayısı 22 ve tam yükte çalışma hızı 1390 rpm’dir.

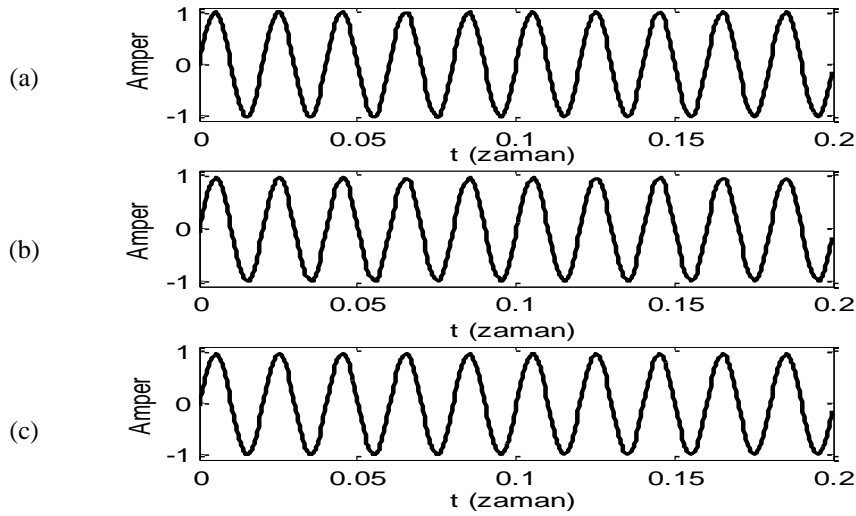
Kullanılan üç fazlı asenkron motorların faz akımlarını ölçmek için üç adet akım sensörü kullanılmıştır. Motordan ölçülen akım değerleri 16 bitlik Advantech PCL-816 model veri toplama kartı kullanılarak bilgisayara aktarılmaktadır.

Kurulan deney düzeneği Şekil 7’de verilmiştir. Her bir durum için örnekleme oranı 3.000 örnek/saniye ile faz akımları üç saniye boyunca okunarak bilgisayara kaydedilmiştir. Asenkron motordan veri aktarım hızı 3000 örnek/saniye olduğundan her periyottaki örnek sayısı denklem (8)’e göre 60 olarak bulunur. Her pencere toplam on periyottan oluştuğundan bir pencerenin boyutu 600 örnekten oluşur. Her bir on periyotluk sinyal arıza teşhisi için yeterli olmaktadır. Şekil 8’de sağlam ve bir kırık ve iki kırık rotor çubuğuna sahip motorun A fazından alınan akım sinyalleri görülmektedir.

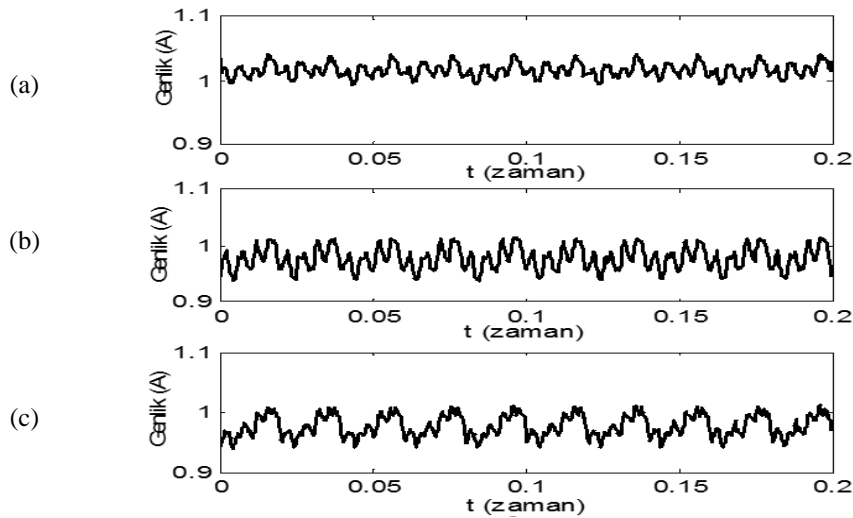
Şekil 8’deki akım sinyallerinden arızanın belirlenmesi oldukça zordur. Elde edilen her on periyotluk akım sinyallerine Hilbert dönüşümü uygulanmıştır. Sağlam ve arızalı motorlar için örnek bir dönüşüm Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 7. Bu çalışmada geliştirilen deney düzeneği

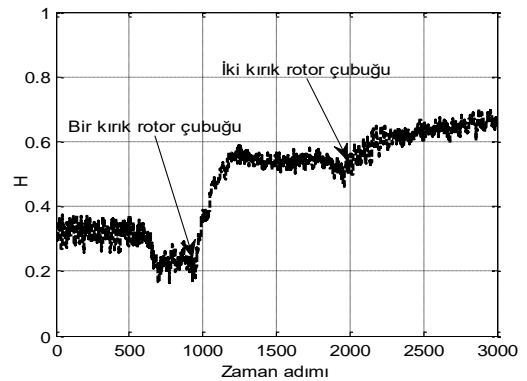


Şekil 8. Farklı durumlar için faz akımları (a) Sağlam (b) Bir kırık rotor çubuğu (c) İki kırık rotor çubuğu



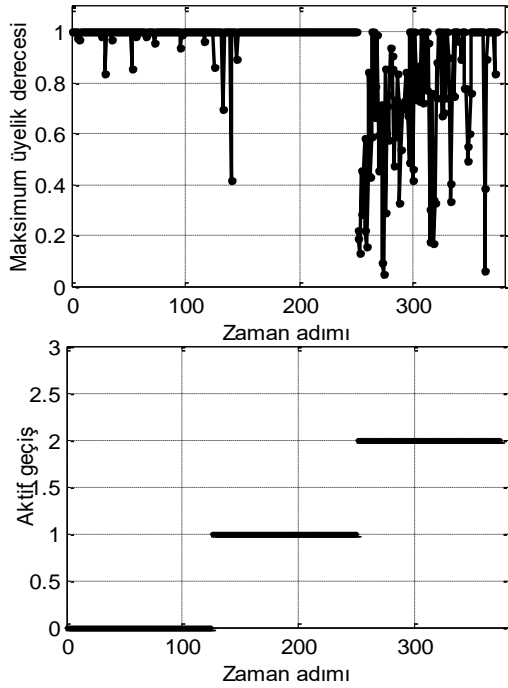
Şekil 9. Özellik sinyali (a) Sağlam (b) Bir kırık rotor çubuğu (c) İki kırık rotor çubuğu

Şekil 9'da elde edilen her on periyotluk verinin sembol serisi oluşturulmakta ve daha sonra bu serinin entropi ağacı elde edilmektedir. Bu çalışmada entropi ağacının seviyesi üç olarak belirlenmiştir. Entropi ağacı elde edildikten sonra ardışık iki kayan pencere arasındaki entropi hesabı denklem (13)'e göre hesaplanır. Daha sonra bu entropi değeri bulanık otomata verilerek arıza teşhisi yapılmaktadır. Gerçek zamanlı test işlemi için her bir durumdan 1200 örnek alınmıştır. Bu veriler tek bir sinyal olarak birleştirilip sisteme verilmiştir. Şekil 10'da gerçek zamanlı izleme esnasında her bir durum için entropi değişimi gösterilmiştir.



Şekil 10. İzleme esnasında entropi değişimi

Şekil 10'da görülebileceği gibi sağlam ve arızalı durumlar arasındaki entropi değerleri oldukça farklıdır. Sağlam durumdan kırık rotor çubuğu arızasına geçerken küçük bir düşüş gözlenmektedir. Bunun sebebi aynı pencere içerisinde hem arızalı hem de sağlam verilerin olmasıdır. Her adımda hesaplanan entropi değeri bulanık otomataya verilir ve motorun durumu belirlenmektedir. Otomata üç adım boyunca aynı arıza türü ile ilgili veri alırsa o arıza ile ilgili son duruma ulaştığından motor durumu gösterilmektedir. Şekil 11 'de bulanık otomatanın izleme esnasında her bir durum için çıkışı gösterilmiştir.



Şekil 11. İzleme esnasında bulanık otomata çıkışı

Şekil 11 'de izleme esnasında entropi çıkışının maksimum üyelik derecesi ilk olarak hesaplanmaktadır. Maksimum üyelik fonksiyonu denklem (14)'e göre hesaplanmaktadır. Her bir arızanın son durumuna ulaşıldığında ise o anki aktif geçiş gösterilmektedir.

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada asenkron motorlarda oluşan arızalardan kırık rotor çubuğu için bulanık otomata tabanlı bir yöntem sunulmuştur. Önerilen yöntem arıza teşhisi için sadece motor akımına ihtiyaç duymaktadır. Stator akımının her on periyotluk kısmı bir pencere olarak alınıp sembol serisi oluşturulmakta ve bu serinin entropi ağacı oluşturulmaktadır. Ardışık pencereler arasındaki entropi değeri bulanık otomataya verilerek motor durumunun gerçek zamanlı izlenmesi sağlanmaktadır. Bu çalışmanın avantajları şöyle sıralanabilir:

- Herhangi bir şekilde motor kaymasının hesaplanmasına ihtiyaç duymamak,
- Yüksüz durumda tespit edilmesi zor olan kırık rotor çubuğu arızaları için yeni bir yöntem olması,
- Sadece on periyotta veri alınmasının arıza teşhisi için yeterli olması, dolayısıyla çok fazla veri kaydına ihtiyaç duyulmaması,
- Gerçek zamanlı olarak arıza teşhisinin yapılabilmesi,

Önerilen yöntemin sunduğu bu avantajlar deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Yöntem farklı ön işleme teknikleri kullanılarak diğer arıza türlerinin tespiti için de kullanılabilir.

## Teşekkür

Bu çalışma 0692.STZ.2014 Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Santez projesi ve TÜBİTAK 109E105 projesi kapsamında desteklenmiştir.

## 7. Kaynaklar

1. Aydın, I., Karaköse, M., and Akın, E. (2015). Combined intelligent methods based on wireless sensor networks for condition monitoring and fault diagnosis, *Journal of Intelligent Manufacturing* **26.4**:717-729. DOI: 10.1007/s10845-013-0829-8
2. Batista, F. B., Lamim Filho, P. C. M., Pederiva, R., and Silva, V. A. D. (2016). An empirical demodulation for electrical fault detection in induction motors, *IEEE Transactions on Inst. and Measurement*, **65(3)**: 559- 569.

3. Akin, E., Aydin, I. and Karakose, M. (2011). FPGA based intelligent condition monitoring of induction motors: Detection, diagnosis and prognosis, IEEE International Conference on Industrial Technology.
4. Burriel-Valencia, J., Puche-Panadero, R., Martinez-Roman, J., Sapena-Bano, A. and Pineda-Sanchez, M. (2017). Short-Frequency Fourier Transform for Fault Diagnosis of Induction Machines Working in Transient Regime, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. DOI: 10.1109/TIM.2016.2647458
5. Jung, J. H., Lee, J. J. and Kwon, B. H. (2006). Online diagnosis of induction motors using MCSA, IEEE Trans. Ind. Electron., **33**:1842-1852.
6. Briz, F., Degner, M. W., Garcia, P. and Bragado, D. (2008). Broken rotor bar detection in line-fed induction machines using complex wavelet analysis of startup transients, IEEE Trans. Ind. App., **44** : 760-768.
7. Supangat, R., Ertugrul, N., Soong, W.L., Gray, D.A. Hansen, C. and Grieger, J. (2006). Detection of broken rotor bars in induction motor using starting-current analysis and effects of loading, IET Proc. Electr. Power Appl., **153**, pp. 848-855.
8. Gupta, D. and Choubey, S. (2015). Discrete wavelet transform for image processing. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, **4(3)**: pp. 598-602.
9. Bessam, B., Menacer, A., Boumehraz, M. and Cherif, H. (2016). Detection of broken rotor bar faults in induction motor at low load using neural network. ISA transactions, **64**: 241-246.
11. Aydin, I., Karakose, M., and Akin, E. (2015). Anomaly detection using a modified kernel-based tracking in the pantograph–catenary system. Expert Systems with Applications, **42(2)**:938-948.
12. Brockwell, P. J. and Davis, R. A. (2013). Time series: theory and methods. Springer Science & Business Media.
13. Panadero, R. P., Sanchez, M. P., Guasp, M. R., Folch, J. R., Perez, E. H. and Cruz, J. P. (2009). Improved resolution of the MCSA method via Hilbert transform, enabling the diagnosis of rotor asymmetries at very low slip, IEEE Trans. Energy Conv., **24**:52-59.
14. Rigatos, G. G. (2009). Fault detection and isolation based on fuzzy automata, Information Sciences, **178**:1893-1902.
15. Cui, C., Dang, Z., Fischer, T. R. and Ibarra, O. H. (2016). Execution information rate for some classes of automata. Information and Computation, **246**: 20-29.
16. Salomaa, A. (2014). Theory of automata, Cilt. 100. Elsevier.
17. Yaman, O., Karakose, M., Aydin, I. and Akin, E. (2014). Detection of pantograph geometric model based on fuzzy logic and image processing. In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), pp. 686-689.
18. Yaman, O., Karaköse, E., Aydın, İ., Karaköse, M., and Akin, E. (2017). Pantograf-katener sistemler için bulanık mantık tabanlı belirlenen pantograf modeli kullanılarak ark tespiti yaklaşımı. Sakarya University Journal of Science, **21(4)**:724-739.
19. Santur, Y., Karaköse, M. and Akin, E. (2016). Chouquet fuzzy integral based condition monitoring and analysis approach using simulation framework for rail faults. International Conference on In Industrial Informatics (INDIN), pp. 345-350.
20. Li, L. and Daowen Q. (2015). On the state minimization of fuzzy automata, IEEE Transactions on Fuzzy Systems **23**: 434-443.
21. Karakose, M., Yaman, O., Aydin, I., and Karakose, E. (2016). Real-time condition monitoring approach of pantograph-catenary system using FPGA. IEEE 14th International Conference on In Industrial Informatics (INDIN), pp. 481-486.



## Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Konik Geçme Bağlantılarının Burulma Momenti Etkisindeki Davranışları

Murat Yavuz SOLMAZ, Betül TAŞ

Fırat University, Engineering Faculty, Department of Engineering, 23119 Elazığ/Turkey  
mysolmaz@firat.edu.tr

(Geliş/Received:07.12.2017; Kabul/Accepted:15.03.2018)

### Özet

Bu çalışmada 3 farklı yapıştırıcı ile birleştirilmiş konik geçme bağlantılarının burulma momenti altındaki performansları sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmada ANSYS 14.5 paket programı kullanılmıştır. Çalışmada 2°51', 5°43' ve 11°25' olmak üzere 3 farklı koni tepe açısı kullanılarak modellenen yapıştırıcı bağlantılar yapıştırıcısız konik geçme bağlantısıyla karşılaştırılmıştır. Burulma momenti etkisi altındaki modellerin A-B hattı boyunca oluşan Von Mises eşlenik ( $\sigma_{es}$ ),  $\tau_{xz}$  ve  $\tau_{yz}$  kayma gerilme değerleri tespit edilmiştir. Analizler sonucunda, yapıştırıcısız bağlantılarda meydana gelen tüm gerilme değerlerinin yapıştırıcı bağlantılara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Tüm bağlantılarda koni tepe açısı artışının gerilme değerlerini düşürdüğü tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Konik Geçme, Yapıştırıcı Bağlantılar, Burulma, Kesit Dönmesi, ANSYS

## Behaviour of Conical Adhesive Joints Under the Action of Torsional Moment

### Abstract

In this study, the performance of conical joints made of three different adhesives is numerically examined under the action of the torsional moment. ANSYS 14.5 package program was used in the numerical analysis. The conical adhesive joints having three different angular strain twist angle of 2°51', 5°43' and 11°25' were compared to the cone clamped connections. Von Mises conjugated ( $\sigma_{es}$ ) and shear stress values ( $\tau_{xz}$  and  $\tau_{yz}$ ) of the models under the action of the torsional moment along the A-B line were determined. As a result of the analysis, it is seen that all the stress values of the cone clamped connections are higher than those in the conical adhesive joints. It is concluded that increase in the angular strain twist angle decreases the stress values for all joint models.

**Keywords:** Cone clamping, Adhesive Joints, Torsion, Angular Strain, ANSYS

### 1.Giriş

Bulduğumuz 21. yüzyılda gelişen teknolojiyle beraber, yapıları birleştirmek ve kullanım süreleri içerisinde bir bütün olarak bir arada tutmak maksadıyla birçok malzeme ve birleştirme tekniği geliştirilmiştir. Geleneksel yöntemlerin (perçin, lehim, kaynak bağlantıları vb.) yanı sıra yapıştırıcı bağlantıların kullanım alanı bu yüzyılda daha fazla artmıştır. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların diğer bağlantı türlerine göre birçok avantajı olduğu araştırmacılar tarafından deneysel, analitik ve sonlu elemanlar metodu yardımıyla ortaya çıkarılmıştır.

Yapıştırma bağlantılarının kullanım alanları; otomotiv, uzay havacılık ve diğer endüstri dallarında artmaktadır. Yapılan çalışmalar, montajı gerçekleştirilen yapılardaki deformasyonun yaklaşık %70'nin bağlantı yapılan kısımlardan başladığını göstermektedir. Tek katlı bağlantılar basit ve verimlilik yüzdeleri nedeniyle yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Aynı zamanda yapıştırıcıların mekanik özelliklerini tespit etmek için standart bir test modeli halini almaktadır. Bununla birlikte tek katlı bağlantının gerilme analizi, günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından araştırılmış olup bazı tartışmalı yayınlar ortaya konulmuştur. Örnek olarak, birçok analiz sonucunda kayma gerilmelerinin yapışkan tabakanın serbest ucunda

maksimum olduğunu belirtirken bazı analizlerde ise serbest uçlara yakın bir mesafede olduğu gösterilmiştir [1].

Malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırıcı kullanmak, mekanik bağlantı elemanları kullanılmasına kıyasla daha fazla avantaj sunar. Yapıştırıcı, yük ve gerilmeleri birleşim yüzeyinin tamamına yayarak dinamik ve statik yüklerin düzgün dağılmasını sağlar, gerilmelerin bir noktada yoğunlaşmasını engeller. Bu sebeple, yapıştırıcı bağlantı mekanik yöntemlerle (kaynak, perçin, lehim) birleştirilen bağlantılara göre bükülme ve titreşime karşı daha dayanıklıdır [2].

Yapıştırıcı ile birleştirilme, kompozit malzemelerin kullanıldığı bağlantılarda en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Uç ve havacılık sanayi uygulamalarında mukavemetin, hafifliğin ve malzemelerin deforme olmamasının gerektiği durumlarda yapıştırıcı ile birleştirme ön plana çıkmaktadır. Boeing 747 uçak gövdesi elemanlarının % 62'si yapıştırıcı ile birleştirilmiştir [3].

Yapıştırıcı ile birleştirme, yapıştırıcı bölgesinde yük transferinin başarılı bir şekilde sağlanması, yapıştırıcı tabaka boyunca gerilmenin düzenli dağılımı, korozyona karşı direnç, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, dizayn kolaylığı, yüksek sönüm yeteneği, kolay montaj, ekonomiklik ve farklı malzemelerin birleştirilmesi gibi önemli nedenlerden dolayı günümüz geleneksel bağlantı elemanlarının yerini almakta, endüstriyel birçok alanda özellikle uç ve havacılıkta kullanılmaktadır [4]. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarının analizinde sonlu elemanlar yöntemini ilk olarak Wooley ve Carver kullanmıştır [5]. Bunu takiben birçok araştırmacı sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analizler yapmışlardır. Yapıştırıcı bağlantılarında, Volkersen ilk olarak klasik mekanik yaklaşımı kullanarak çalışmalar yapmıştır [6,7]. Bagheri ve Marouf, epoksi reçine kullanarak alüminyum tabakaları birleştirmiştir. Yapıştırıcılara çeşitli kimyasal maddeler ilave ederek modifiye edilmiş ve bu yapıştırıcı kompozisyonunun ara yüzey kırılma enerjisi üzerine etkisi DCB (Double Cantilever Beam) testiyle ölçülmüştür. Yapıştırıcının mekanik özelliklerini darbe testi ile belirlemiştir. DCB testinin sonucuna göre; plastik parçacıklarının ilavesiyle epoksinin ara yüzey

kırılma enerjisi artmaktadır [8]. Fekirini ve arkadaşları, yüzeyinde çatlak olan bir tabakanın tamirini yapmak için farklı kayma modülüne (G) sahip olan iki yapıştırıcı kullanarak sonlu elemanlar metodu ile analiz yapmışlardır. Bu iki yapıştırıcının birincisi çatlak olan yüzeye uygulanmış ikincisi ise hasar olmayan yüzeye uygulanmıştır. Birinci yapıştırıcının yük transferini sağlanması hedeflenmiş ikincisiyle de birinci yapıştırıcının hasara uğramasının engellenmesi hedeflemiştir. Yapılan analiz sonucunda çatlağın olduğu uç ve çatlak bölgesinde yorulma ömrünün büyük oranda iyileştiği görülmüştür [9]. Davies ve arkadaşları, yapıştırıcı kalınlığının etkisini incelemek için bir çalışma yapmışlar ve epoksi yapıştırıcı kullanarak alüminyum parça bağlantılarının özelliklerini çeşitli test yöntemleriyle incelemiştir. Mekanik analizler sonucunda, yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla kopma mukavemetinin azaldığını tespit etmişlerdir. İdeal yapıştırıcı kalınlığının 0.8 mm veya daha düşük olması gerektiğini belirlemiştir [10]. Özel, Aydın ve Temiz, tek katlı bir yapıştırma bağlantısına eğilme momenti uygulayarak, iki boyutlu non-lineer Sonlu Elemanlar Metodu(SEM) ile elasto-plastik gerilme analizi yapmışlardır. Geometrik özelliklerin tek katlı yapıştırma bağlantısının mukavemetine etkisini belirlemek amacıyla, her bir yapıştırıcı için dört ayrı parça kalınlığı ve bindirme bölgesi uzunluğu seçmişlerdir. Elde edilen sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırmış, yapıştırılan parça kalınlığının artmasının bağlantı mukavemetini önemli ölçüde etkilediğini, esnek yapıştırıcılarda bindirme bölgesinin uzunluğunun artması ile taşınan yükün arttığını tespit etmişlerdir [11]. Taib ve arkadaşları, basit bindirme ve eğimli bindirme bağlantısı için iki farklı yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantı konfügrasyonlarının sonlu elemanlar metoduyla analizini yapmışlardır. Yapılan deneysel analizler sonucunda yapıştırıcı tabakayı non-lineer olarak kabul ederken yapışan malzemelerin davranışının ise lineer elastik olduğunu kabul etmişlerdir. Aynı zamanda bağlantının non-lineer geometrik deformasyonları da dikkate alınmıştır. Sonuç olarak sonlu elemanlar modeli ile doğru tespit edilen yüklerin altında, eğimli bindirme bağlantılarda ayırt edici deformasyonlar gözlenmiştir [12].

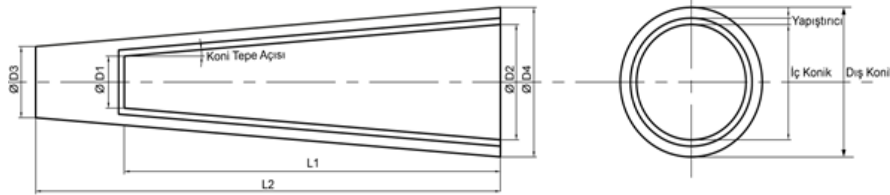
Taş ve arkadaşları, bindirme bağlantılarında bindirme kenarındaki yapıştırıcı birikintisinin bağlantı mukavemetine olan etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla basit (single) ve dalgalı bindirme (wavy lap) olmak üzere iki farklı bağlantı tipi göz önüne alınarak birikintisiz ( $0^\circ$ ),  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  birikintili toplam 8 model oluşturulmuş ve bu bağlantıların ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak lineer elastik gerilme analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Analizler neticesinde bağlantıların bindirme bölgeleri üzerinde oluşan maksimum eşlenik ve soyulma gerilmelerini elde etmişlerdir. Sonuçta;  $0^\circ$  kenar birikintili wavy-lap bağlantıda meydana gelen maksimum eşlenik gerilme değerinin  $0^\circ$  kenar birikintili single-lap bağlantıya göre yaklaşık %41 olduğunu tespit etmişlerdir [13]. Apalak ve Davies, tek ve iki plakanın eğildiği ve bunların eğilen bölgelerinin diğerinin yüzeyi boyunca yapıştırıldığı, tek ve çift destekli köşe bağlantılarını incelemişlerdir. Artan yatay ve dikey destek boylarının yapıştırıcı-plaka ara yüzeyinde ortaya çıkan gerilme yığılmalarını azalttığını ve yapıştırıcı tutturma miktarının da enine yoğunlaşmış yükler ve eğilme momentleri altında yapıştırıcının pik gerilme seviyeleri üzerinde etkin bir parametre olduğunu belirtmişlerdir [14]. Nemeş ve Lachaud, çift katlı bindirme bağlantılarında yapıştırıcı kalınlığını 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 1 mm seçerek yapıştırıcı kalınlığının etkisini incelemişlerdir. Yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla yapıştırıcıda meydana gelen maksimum gerilmenin azaldığını, kayma ve soyulma gerilmelerinin uç noktalar hariç tutmak üzere üniform olarak tüm bindirme mesafesi üzerine dağıldığını tespit etmişlerdir. Yapıştırıcı kalınlığı 1 mm iken kayma gerilmesinin minimum olduğunu belirtmişlerdir [15]. Solmaz, farklı özelliklere sahip yapıştırıcılar kullanarak farklı bindirme mesafelerinde farklı uç açısına sahip malzemeleri (adherent) birleştirmiştir. Yapıştırıcı ile birleştirilen bağlantılar çekme deneyine tabi

tutulmuş ve bu deneyler sonucunda bağlantıların hasar tipleri ve kuvvetleri belirlenmiştir. Bu bağlantıların çekme deneyi sonucunda hasara uğrayan yapıştırma yüzeyleri incelendiğinde,  $0^\circ$  ( $90^\circ$  ya da açısız) uç açısına sahip numunelerde meydana gelen hasar tipinin “kohesiv hasarı”, uç açısı  $0^\circ$ 'nin dışında kalan tüm numunelerde ise “özel kohesiv hasarı” olduğu belirlenmiştir [16,17]. Aydın, prizmatik geçmeli yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda bindirme mesafesi, yüzey pürüzlülükleri, yapıştırıcı kalınlıkları ve farklı özellikleri olan yapıştırıcı türlerinin aksel çekme yükü altındaki mekanik davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Yüzey pürüzlülüğünün ve bindirme mesafesinin artması ile bağlantı mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak belirli bir noktadan sonra bu değerlerin artmasının bağlantı mukavemetine etkisinin olmadığını tespit etmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla bağlantının mukavemetinin azalmasıyla birlikte daha düzgün bir gerilme dağılımı oluşturduğunu belirtmiştir [18,19].

Bu çalışmada, yapıştırıcılı olarak birleştirilmiş konik geçme bağlantılarının burulma momenti altındaki mekanik davranışları incelenecektir. Bu amaçla, Akfix E 300, Devcon A ve Erde GTR olmak üzere 3 farklı yapıştırıcı türüne sahip, 3 farklı koni tepe açılı yapıştırıcılı ve yapıştırıcısız bağlantılar ANSYS paket programı kullanılarak sayısal olarak incelenecektir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada yapıştırıcılı ile birleştirilmiş konik geçme bağlantılarının, burulma momenti etkisi altındaki davranışlarına yapıştırıcı cinsinin, koniklik açısının etkisi araştırılmıştır. Şekil 2.1'de yapıştırıcı ile birleştirilmiş konik geçme bağlantılarının teknik resmi, Tablo 2.1'de ise koniklik açısına bağlı olarak bu bağlantıların ölçüleri verilmiştir.



Şekil 2.1. Yapıştırıcılı konik geçme bağlantısının teknik resmi

**Tablo 2.1.** Konik geçme bağlantılarının ölçüleri

Koni tepe açısı	D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)	D <sub>3</sub> (mm)	D <sub>4</sub> (mm)	L <sub>1</sub> (mm)	L <sub>2</sub> (mm)
2°51'	10	15	15.6	21.6	100	120
5°43'	10	20	14.6	26.6	100	120
11°25'	10	30	12.6	36.6	100	120

Çalışmada, bağlantı malzemesi olarak St 60 imalat çeliği yapıştırıcı olarak ise epoksi bazlı 2 adet (Devcon A, Akfix E300) ve akrilik bazlı 1 adet (Erde GTR) olmak üzere toplam 3 farklı

özellikte yapıştırıcı kullanılmıştır. Bağlantı malzemesinin ve yapıştırıcıların mekanik özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

**Tablo 2.2.**Bağlantı malzemesinin ve yapıştırıcıların mekanik özellikleri[18]

	Test Metodu			
	ISO 527	ISO 527	ISO 527	ISO 178
	Akma Mukavemeti	Çekme Mukavemeti	Poisson Oranı	Elastisite Modülü
<b>AKFIX E</b>	-	34.1	0.32	758
<b>DEVCON A</b>	-	26.5	0.35	663
<b>ERDE GTR</b>	2.01	7.9	0.36	93
<b>St 60</b>	-	600	0.35	210000

Elastisite modülü (E) ve poisson oranı ( $\nu$ ) kullanılarak bağlantı malzemesinin ve yapıştırıcıların kayma modülleri (G) denklem hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 2.3'te verilmiştir.

Yapıştırıcıların mekanik davranışları, plastikler için geliştirilmiş standartlara uygun olarak hazırlanmış numunelerin çekme cihazına bağlanıp tek eksenli gerilme uygulanması ile belirlenir.

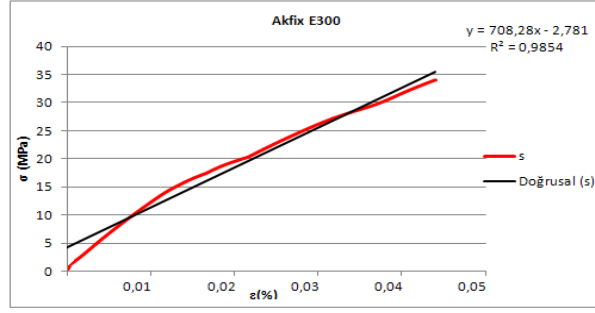
**Tablo 2.3.** Bağlantı malzemesinin ve yapıştırıcıların kayma modülü

	Kayma Modülü(Mpa)
<b>AKFIX E 300</b>	287
<b>DEVCON A</b>	245
<b>ERDE GTR</b>	34
<b>St 60</b>	81000

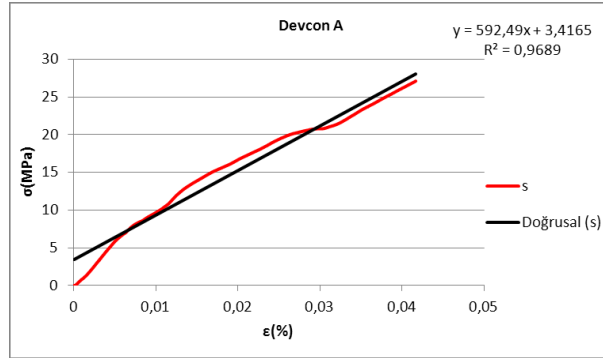
Yük altında malzemelerin bünyesinde meydana gelen gerilme-şekil değiştirmeleri mekanik davranışlarını en genel açıklayan kavramdır. Bu amaçla yapılan bir çalışmadan alınan yapıştırıcıların sırasıyla Şekil 2.2, 2.3, 2.4 gerilme-şekil değiştirme diyagramları verilmiştir.

Tablo 2.1'de verilen teknik resme uygun olarak ANSYS paket programında her bir

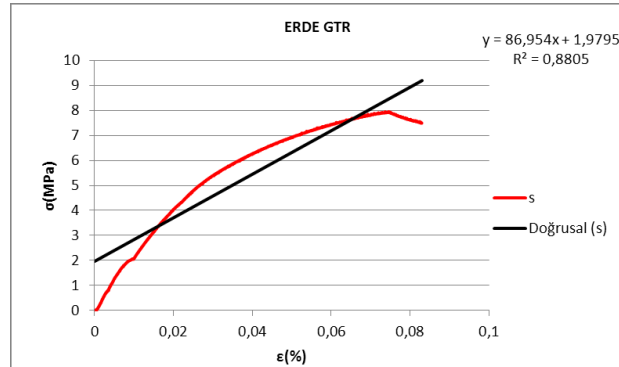
parametre için bağlantı modelleri oluşturulmuştur. ANSYS paket programında kullanılan modellere uygun, bağlantı elamanı ve yapıştırıcı yüzey için üç serbestlik derecesi ve 10 düğüm noktasına sahip üç boyutlu SOLID187 eleman tipi seçilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde meshleme işlemi çok önemlidir.



Şekil 2.2. Akfix E300 gerilme-şekil değiştirme diyagramı[18]



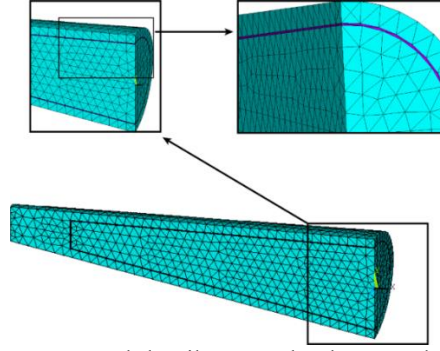
Şekil 2.3. Devcon A gerilme-şekil değiştirme diyagramı[18]



Şekil 2.4. Erde GTR gerilme-şekil değiştirme diyagramı[18]

Çalışmada gerilme dağılımının daha duyarlı tespiti için tüm bağlantılar mümkün oldukça çok sayıda ve aynı boyutta elemanlara bölünmüştür. Şekil 2.5'de koni tepe açısı 11°25' olan

yapıştırıcılı konik geçme bağlantısının dikey eksen kesitindeki mesh yapısı, Tablo 2.4'de ise tüm bağlantılar için eleman ve düğüm sayıları verilmiştir.



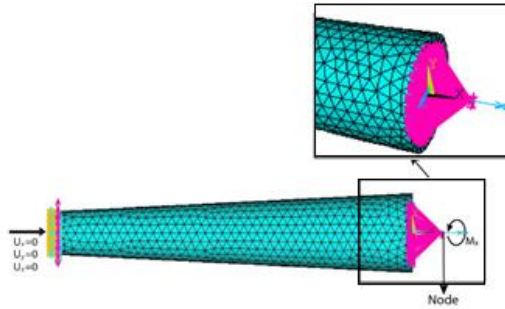
Şekil 2.5. Koni tepe açısı  $11^{\circ}25'$  olan yapıştırıcılı konik geçme bağlantı modelinin düşey eksen kesitindeki sonlu elemanlar ağ yapısı

Tablo 2.4. Tüm bağlantılar için düğüm ve eleman sayısı

Bağlantı Tipi	Koni Tepe Açısı	Düğüm Sayısı	Eleman Sayısı
Yapıştırıcılı	$2^{\circ}51'$	16818	11169
	$5^{\circ}43'$	21060	14331
	$11^{\circ}25'$	31548	21712
Yapıştırıcısız	$2^{\circ}51'$	11888	7631
	$5^{\circ}43'$	16076	10649
	$11^{\circ}25'$	24820	16761

Çalışmada konik geçme bağlantısının dış konik ucu ankastre olarak sabitlenmiştir. İç koniğin ön yüzeyine kontak oluşturularak dışta tanımlanan bir node ile bağlanmıştır. Bu işlemin amacı iç koniğe moment uygulayabilmektir. Node x yönünde uygulanan  $M_x=1000$  Nmm moment ile model burulmaya zorlanmıştır.

Burulma momenti sıfırdan başlayıp kademeli artırılarak 1000 Nmm şeklinde uygulanmıştır. Ve çözümler elde edilmiştir. Şekil 2.6'da koni tepe açısı  $11^{\circ}25'$  yapıştırıcılı bağlantıya uygulanan sınır şartları ve burulma momenti yönü gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Bağlantılara uygulanan sınır şartları ve burulma momenti

Koni tepe açısı ve yapıştırıcı kalınlığından dolayı numunelerin y koordinat değerleri değişmektedir. Farklı parametrelere sahip numunelerin sonuçlarını karşılaştırabilmek için

Şekil 2.7 görülen A-B hattı boyunca düşey eksen koordinatı (y), dış çapa bölünerek A-B hattı için normalizasyon işlemi yapılmıştır.

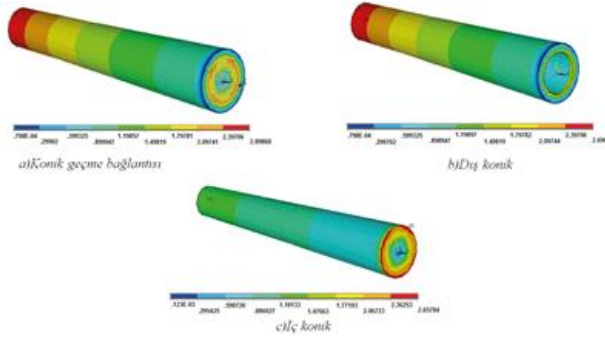


Şekil 2.7. Farklı koni tepe açılına sahip bağlantılar için normalleştirilmiş A-B hattı.

### 3.Sonuçlar ve Değerlendirme

Çalışmada uygulanan burulma momenti sonucunda  $\sigma_{eş}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$  gerilme dağılımları incelenmiştir. Şekil 3.1, koni tepe açısı  $2^{\circ}51'$

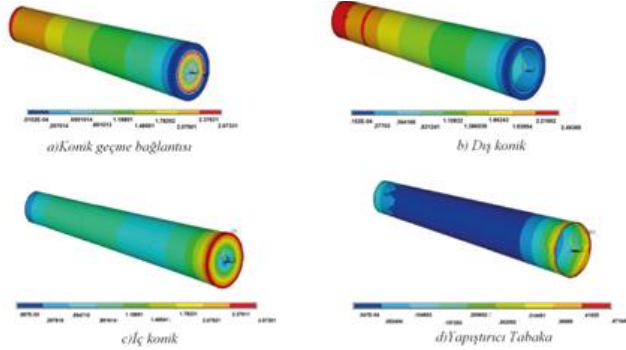
olan yapıştırıcısız bağlantının eşlenik gerilme dağılımını göstermektedir. Maksimum eşlenik gerilme konik geçme bağlantısında 2.89 MPa minimum eşlenik gerilme ise iç konikte 2.65 MPa'dır.



Şekil 3.1. Koni tepe açısı  $2^{\circ}51'$  olan yapıştırıcısız bağlantının Von Mises eşlenik gerilme dağılımı

Şekil 3.2'de, koni tepe açısı  $2^{\circ}51'$  olan Akfix E300 ile birleştirilmiş bağlantının eşlenik gerilme dağılımını göstermektedir. Maksimum

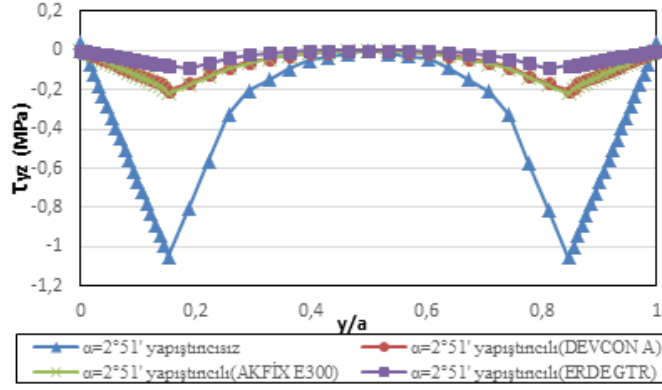
eşlenik gerilme konik geçme bağlantısında 2.67 MPa olarak tespit edilmiştir. Minimum gerilme ise dış konikte 2.49 MPa olarak gerçekleşmiştir.



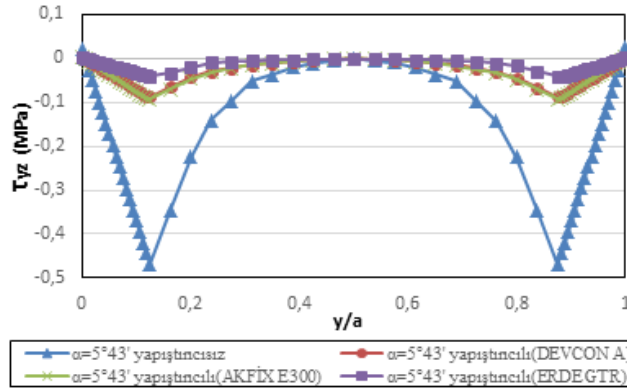
Şekil 3.2.  $45^{\circ}$  Koni tepe açısı  $2^{\circ}51'$  olan Akfix E300 ile birleştirilmiş bağlantının Von Mises eşlenik gerilme dağılımı

Şekil 3.3. a, b ve c, koni tepe açısı sırası ile yapıştırıcısız ve yapıştırıcılı konik geçme

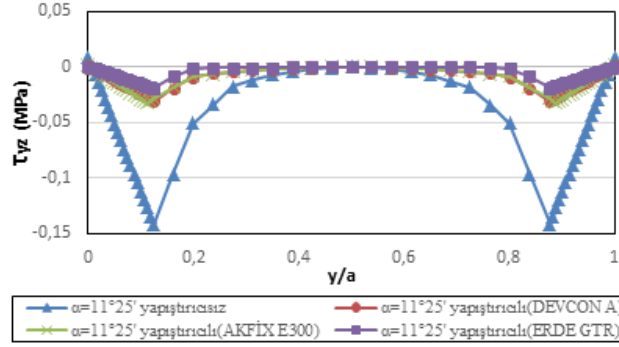
bağlantılarında meydana gelen  $\tau_{yz}$  kayma gerilme dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 3.3.a. Koni tepe açısı 2°51' olan bağlantılarının  $\tau_{yz}$  kayma gerilmesi dağılımları



Şekil 3.3.b. Koni tepe açısı 5°43' olan bağlantılarının  $\tau_{yz}$  kayma gerilmesi dağılımları



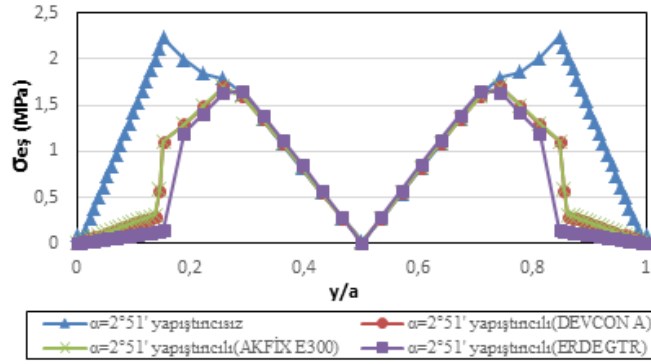
Şekil 3.3.c. Koni tepe açısı 11°25' olan bağlantılarının  $\tau_{yz}$  kayma gerilmesi dağılımları

Şekil 3.3'te maksimum  $\tau_{yz}$  kayma gerilmelerinin yapıştırıcısız bağlantılarda ve minimum gerilmelerin ise Erde GTR ile birleştirilmiş bağlantılarda gerçekleştiği görülmektedir. Bu değerler, yapıştırıcısız bağlantıda, koni tepe açısına göre sırasıyla -1.05 MPa, -0.46 MPa, -0.14 MPa'dır. Benzer şekilde Erde GTR ile birleştirilmiş bağlantıda ise -0.07 MPa, 0.04 MPa, -0.019 MPa'dır. Yapıştırıcısız

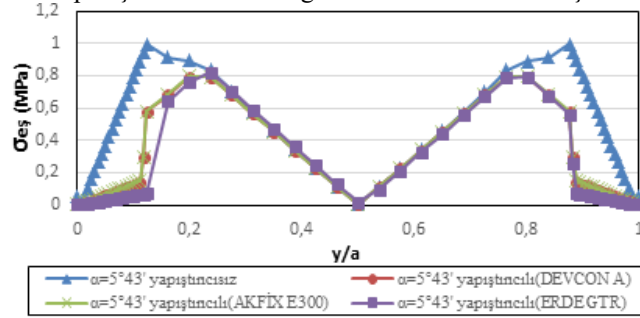
ve Erde GTR ile birleştirilmiş bağlantılar arasındaki en büyük değişimin 15 katlık fark ile koni tepe açısı 2°51' olan bağlantıda gerçekleştiği görülmektedir.

Şekil 3.4. a, b ve c koni tepe açısı sırası ile yapıştırıcısız ve yapıştırıcı konik geçme bağlantılarında meydana gelen eşlenik gerilme dağılımlarını göstermektedir.

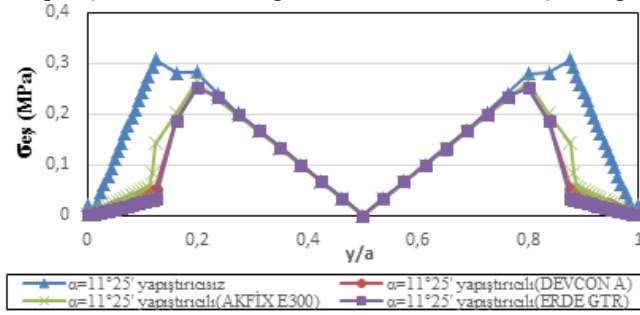




Şekil 3.4.a. Koni tepe açısı 2°51' olan bağlantıların Von Mises eşlenik gerilme dağılımları



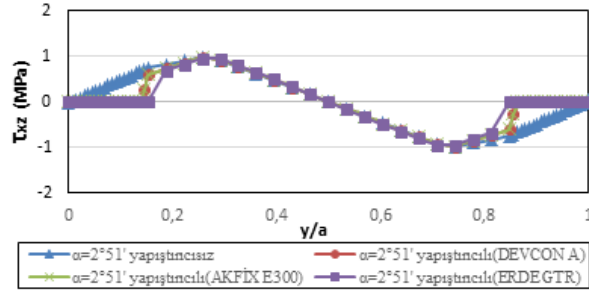
Şekil 3.4.b. Koni tepe açısı 5°43' olan bağlantıların Von Mises eşlenik gerilme dağılımları



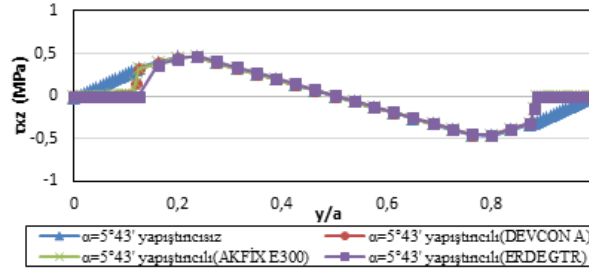
Şekil 3.4.c. Koni tepe açısı 11°25' olan bağlantıların Von Mises eşlenik gerilme dağılımları

Şekil 3.4'de, koni tepe açısı değişimi için eşlenik gerilme dağılımları, her 3 farklı yapıştırıcı için  $y/a=0.3$  ve  $y/a=0.8$  arasında benzer değişim özellikleri göstermektedir. Maksimum eşlenik gerilmelerin her iki bağlantı tipi için koni tepe açısı 2°51' olan bağlantıda gerçekleştiği görülmektedir. Koni tepe açısı 2°51' olan bağlantılarda maksimum eşlenik gerilme, yapıştırıcısız konik geçme bağlantısında

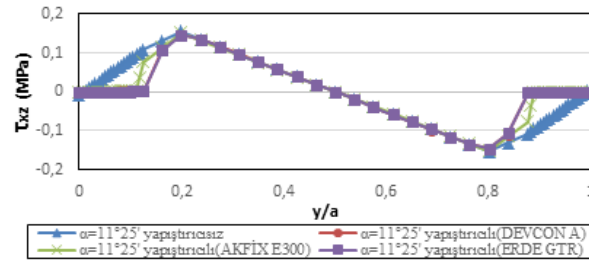
2.2 MPa iken 0.57 MPa azalarak Erde GTR ile birleştirilmiş konik geçme bağlantısında 1.63 MPa' a düşmektedir. Bu fark diğer iki koni tepe açısında sırasıyla 0.24 MPa, 0.05 MPa olmaktadır. Şekil 3.5. a, b ve c, koni tepe açısı sırası ile yapıştırıcısız ve yapıştırıcılı konik geçme bağlantılarında meydana gelen  $\tau_{xz}$  kayma gerilme dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 3.5.a. Koni tepe açısı 2°51' olan bağlantılarının  $\tau_{xz}$  kayma gerilmesi dağılımları



Şekil 3.5.b. Koni tepe açısı 5°43' olan bağlantılarının  $\tau_{xz}$  kayma gerilmesi dağılımları

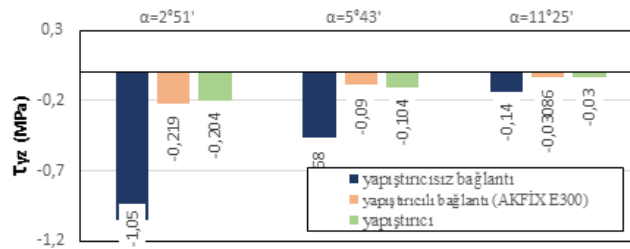


Şekil 3.5.c. Koni tepe açısı 11°25' olan bağlantılarının  $\tau_{xz}$  kayma gerilmesi dağılımları

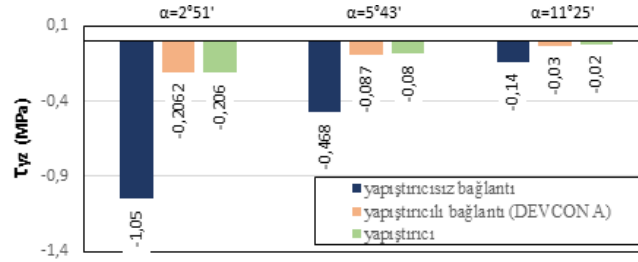
Şekil 3.5'de yapıştırıcısız ve yapıştırıcılı bağlantıların gerilme değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. İki bağlantı tipinin koni tepe açısının değişiminden etkilendiği gözlenmektedir. Her iki bağlantı tipi içinde maksimum  $\tau_{xz}$  kayma gerilmelerinin koni tepe açısı 2°51' olan bağlantıda ve minimum gerilmelerin ise koni tepe açısı 11°25' olan bağlantıda gerçekleştiği görülmektedir. Başka bir ifadeyle koni tepe açısı arttıkça gerilme değerleri düşer. Yapıştırıcısız bağlantıda sırasıyla

meydana gelen maksimum  $\tau_{xz}$  kayma gerilmeleri 0,98 MPa, 0,46 MPa ve 0,15 MPa'dır. Minimum  $\tau_{xz}$  kayma gerilmeleri Erde GTR ile birleştirilmiş yapıştırıcılı bağlantıda sırasıyla 0,97 MPa, 0,43 MPa, 0,14 MPa olarak gerçekleşmektedir.

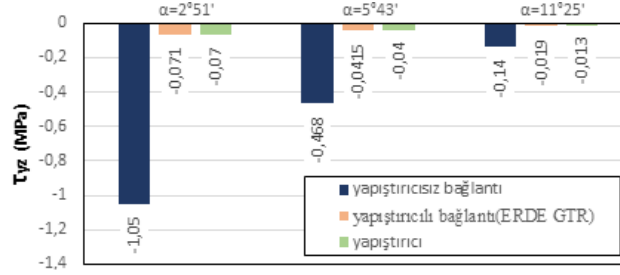
Şekil 3.6. a, b ve c, koni tepe açıları sırasına göre yapıştırıcısız ve yapıştırıcılı konik geçme bağlantılarında ve yapıştırıcı tabakada meydana gelen maksimum  $\tau_{yz}$  kayma gerilme değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.6.a. Koni tepe açıları 2°51', 5°43', 11°25' olan Akfix E300 ile birleştirilmiş bağlantılarının yapıştırıcı tabakanın  $\tau_{yz}$  kayma gerilmesi



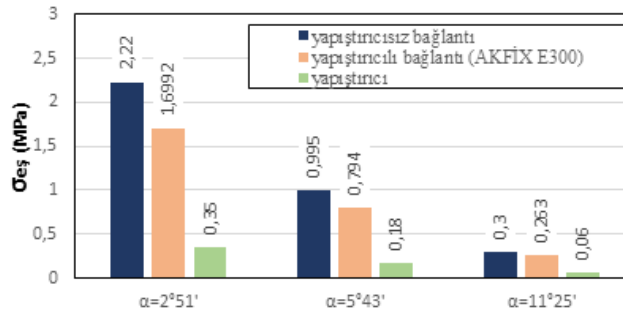
Şekil 3.6.b. Koni tepe açıları 2°51', 5°43', 11°25' olan Devcon A ile birleştirilmiş bağlantıların ve yapıştırıcı tabakanın  $\tau_{yz}$  kayma gerilmesi



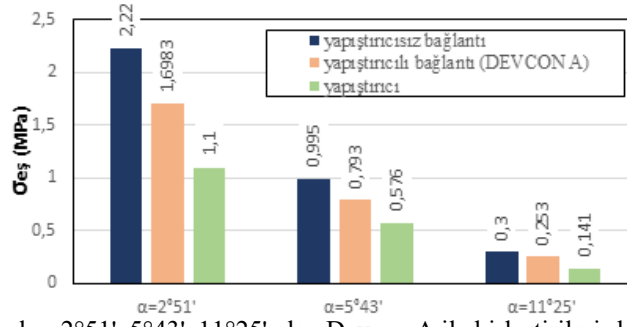
Şekil 3.6.c. Koni tepe açıları 2°51', 5°43', 11°25' olan Erde GTR ile birleştirilmiş bağlantıların ve yapıştırıcı tabakanın  $\tau_{yz}$  kayma gerilmesi

Şekil 3.6'da yapıştırıcısız bağlantıların maksimum  $\tau_{yz}$  kayma gerilme değerlerinin yapıştırıcılı bağlantılardan ve yapıştırıcı tabakasından daha büyük olduğu görülmektedir. Yapıştırıcılı bağlantılar için minimum  $\tau_{yz}$  kayma gerilmesinin Erde GTR ile birleştirilmiş bağlantılarda gerçekleştiği görülmektedir. Bunun nedeni Erde GTR'nin, Akfix E300 ve Devcon A'dan daha düşük kayma modülüne sahip olmasından dolayı şekil değiştirme kabiliyeti daha yüksektir. Buda uygulanan momentin sönümlenmesine neden olarak gerilme değerlerini düşürmektedir. Koni tepe açısı 2°51' olan yapıştırıcısız bağlantının maksimum  $\tau_{yz}$  kayma gerilmesinin sırasıyla Akfix E 300 ile

birleştirilmiş bağlantıdan %400, Devcon A 'dan %425, Erde GTR'den %1379 daha fazla olduğu görülmektedir. Koni tepe açısı 5°43' olan yapıştırıcısız bağlantının maksimum  $\tau_{yz}$  kayma gerilmesinin Erde GTR ile birleştirilmiş bağlantıdan yaklaşık %1050 daha fazladır. Koni tepe açısı 11°25' olan yapıştırıcısız bağlantının maksimum  $\tau_{yz}$  kayma gerilmesinin sırasıyla Akfix E 300'den %367, Devcon A 'dan %365, Erde GTR ile birleştirilmiş bağlantıdan %637 daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 3.7. a, b ve c, koni tepe açıları sırasına göre yapıştırıcısız ve yapıştırıcılı konik geçme bağlantılarında ve yapıştırıcı tabakada meydana gelen maksimum eşleşme gerilme değerleri gösterilmektedir.



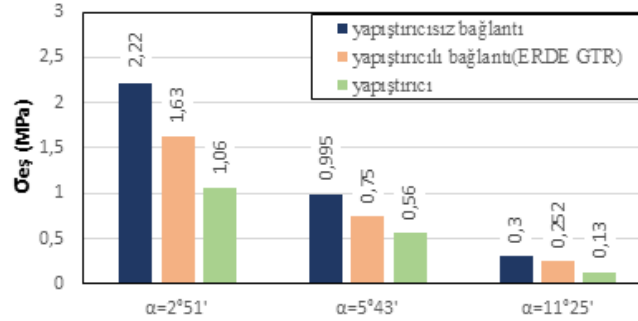
Şekil 3.7.a. Koni tepe açıları 2°51', 5°43', 11°25' olan Akfix E300 ile birleştirilmiş bağlantıların ve yapıştırıcı tabakanın Von Mises eşleşme gerilmeleri



Şekil 3.7.b. Koni tepe açıları 2°51', 5°43', 11°25' olan Devcon A ile birleştirilmiş bağlantıların ve yapıştırıcı tabakanın Von Mises eşlenik gerilmeleri

Şekil 3.7'de koni tepe açısı değişimin etkisi 3 farklı yapıştırıcı türü içinde benzerlik göstermektedir. Yani koni tepe açısı arttıkça

maksimum gerilme değerlerinin düştüğü gözlenmektedir.



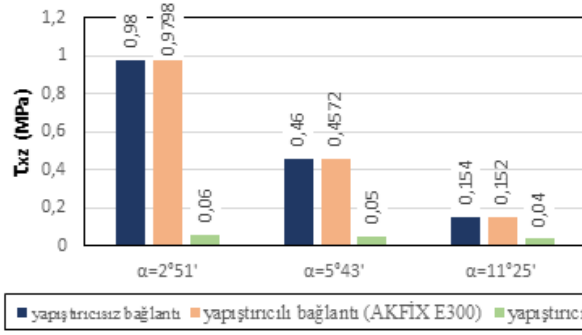
Şekil 3.7.c. Koni tepe açıları 2°51', 5°43', 11°25' olan Erde GTR ile birleştirilmiş bağlantıların ve yapıştırıcı tabakanın Von Mises eşlenik gerilmeleri

Koni tepe açısı 2°51' yapıştırıcısız bağlantının maksimum eşlenik gerilmesinin sırasıyla Akfix E 300 ile birleştirilmiş bağlantıdan %30, Devcon A 'dan %30, Erde GTR'den %34 daha fazla olduğu görülmektedir. Koni tepe açısı 5°43' olan yapıştırıcısız bağlantının maksimum eşlenik gerilmesinin sırasıyla Akfix E 300'den %25, Devcon A 'dan %25, Erde GTR ile birleştirilmiş bağlantıdan %32 daha fazla olduğu görülmektedir. Koni tepe açısı 11°25' olan yapıştırıcısız bağlantının maksimum eşlenik gerilmesinin Akfix E300 ile birleştirilmiş bağlantıdan yaklaşık %16 daha fazladır.

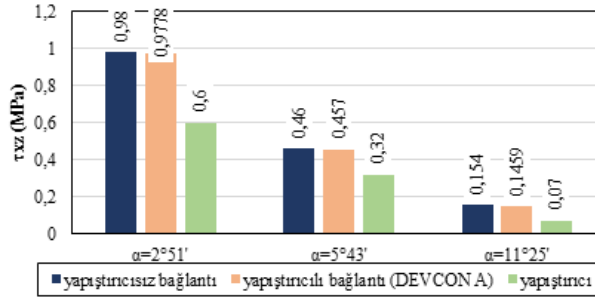
Şekil 3.8. a, b ve c, koni tepe açıları sırasına göre yapıştırıcısız ve yapıştırıcılı konik geçme bağlantılarında ve yapıştırıcı tabakada meydana

gelen maksimum  $\tau_{yz}$  kayma gerilme değerleri gösterilmektedir.

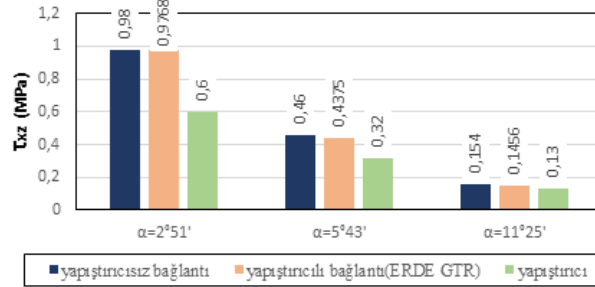
Şekil 3.8'de yapıştırıcı değişiminin yapıştırıcısız bağlantıların maksimum gerilme değerlerinin değişimine etkisinin ve yapıştırıcılı ve yapıştırıcısız bağlantıların maksimum  $\tau_{xz}$  kayma gerilmeleri arasındaki farkın az olduğu görülmektedir. Akfix E300 ile birleştirilmiş koni tepe açısı 2°51' olan bağlantının maksimum  $\tau_{xz}$  kayma gerilmesinin koni tepe açısı 5°43' olan bağlantısından %115 daha fazla olduğu görülmektedir. Erde GTR ile birleştirilmiş koni tepe açısı 5°43' olan bağlantının maksimum  $\tau_{xz}$  kayma gerilmesinin koni tepe açısı 11°25' olan bağlantısından %208 daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 3.8.a. Koni tepe açıları 2°51', 5°43', 11°25' olan Akfix E300 ile birleştirilmiş bağlantıların ve yapıştırıcı tabakanın  $\tau_{xz}$  kayma gerilmesi



Şekil 3.8.b. Koni tepe açıları 2°51', 5°43', 11°25' olan Devcon A ile birleştirilmiş bağlantıların ve yapıştırıcı tabakanın  $\tau_{xz}$  kayma gerilmesi



Şekil 3.8.c. Koni tepe açıları 2°51', 5°43', 11°25' olan Erde GTR ile birleştirilmiş bağlantıların ve yapıştırıcı tabakanın  $\tau_{xz}$  kayma gerilmesi

#### 4.Genel Sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışmada, yapıştırıcılı ve yapıştırıcısız konik geçme bağlantıların burulma momenti altındaki performansları incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

Tüm konik geçme bağlantılarında, koni tepe açısı arttıkça hem Von Mises eşlenik gerilmeleri ( $\sigma_{eş}$ ) hem de  $\tau_{yz}$  ve  $\tau_{xz}$  kayma gerilmelerinin maksimum değerleri azalmaktadır.

Koni tepe açıları 2°51', 5°43' ve 11°25' olan yapıştırıcısız ve yapıştırıcılı konik geçme bağlantıları karşılaştırıldığında  $\sigma_{eş}$ ,  $\tau_{xz}$  ve  $\tau_{yz}$  kayma gerilme değerlerinin yapıştırıcısız konik geçme bağlantılarda daha yüksek olduğu görülmüştür.

Akfix E300, Devcon A, Erde GTR ile birleştirilmiş konik geçme bağlantıları değerlendirildiğinde, kayma modülü en düşük olan Erde GTR ile birleştirilmiş bağlantının, aynı moment altında, oluşan  $\sigma_{eş}$ ,  $\tau_{xz}$  ve  $\tau_{yz}$  kayma gerilme değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Koni tepe açısının değişimi bu durumu değiştirmemektedir. Başka bir ifadeyle Erde GTR ile birleştirilmiş bağlantı tüm açı değerleri için minimum gerilme değerleri sahiptir.

Farklı yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda koni tepe açısı arttıkça maksimum gerilme değerleri arasındaki fark azalır. Yapıştırıcı türünün etkisi, koni tepe açısı 11°25' olan konik geçme bağlantısında diğer iki açı değerine göre daha azdır.

Tüm gerilme dağılımlarının, bindirmenin uçlarında  $y/a = 0$  ve  $y/a = 1$  ve bindirmenin orta bölgesinde  $y/a = 0.50$  minimum değerler aldıkları görülmüştür.

Tüm yapıştırıcılar için  $\tau_{yz}$  kayma gerilmesi dağılımları incelendiğinde gerilme dağılımları benzer bir değişim sergilemişlerdir.

Yapıştırıcı kalınlığı arttıkça hem Von Mises eşlenik gerilmelerinin ( $\sigma_{es}$ ) hem de  $\tau_{yz}$  ve  $\tau_{xz}$  kayma gerilmelerinin maksimum değerleri azalmaktadır.

Yapıştırıcı tabakada meydana gelen  $\sigma_{es}$ ,  $\tau_{yz}$  ve  $\tau_{xz}$  kayma gerilmelerinin değerleri tüm bağlantılardan daha düşüktür.

## 5. Kaynaklar

- Her S., Her C. (2000). Stress analysis of adhesively-bonded lap joints, Department of Mechanical Engineering, Yuan-Ze University, **47**: 673-676.
- Cowdrey S., Ferguson C., Lennox A.F., Mauro P., Neummayer R., Orme B., Müller M., (1998) Loctite Worldwide Design Handbook, Germany
- U.K. Vaidya, A.R.S. Gautam, M. Hosur, P. Dutta., (2006). Experimental-numerical studies of transverse impact response of adhesively bounded lap joints in structures, Int. Journal of Adhesion & Adhesives, **26**: 184-198
- Yıldırım, M., Apalak, M.K. ve Ekici R., (2008). Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Alüminyum-Çelik Sandviç Bağlantıların Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının İncelenmesi, HaSeM'08 VII. Havacılık Sempozyumu, Kayseri, 15-16 Mayıs, s. 134.
- Wooley, G.R. and Carver, D.R., (1971). Stress Concentration Factors for Bonded Lap Joints, J.Aircraft, **8**, **10**: 817-820.
- Volkersen, O., (1938). Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten, Luftfahrtforschung, **15**: pp. 41-47.
- Volkersen, O., 1965. Recherches sur la theorie des assambleges colles, Construction Metallique, **4**: 3-13.
- Baghari, R. and Marouf, B.T. (2007) Fracture Behavior of Multi-Layered Composites Under Impact Loading. Materials Science and Engineering, **448**: 20-24.
- Fekirini H., Bachir Bouiadjra B., Belhouari M., Boutabout B., Serier B. (2007). Numerical analysis of the performances of bonded composite repair with two adhesive bands in aircraft structures. Composite Structures **82**: 84–89
- Davies P., Sohler L., Cognard J. et all. (2009). Influence of adhesive bondline thickness on joint strength, International Journal of Adhesion & Adhesives, **29**: 724–736.
- Aydın, M.D., Özel, A. and Temiz, Ş., (2005), The effect of adherent thickness on the failure of adhesively bonded single-lap joints, J. Adhesion Sci. Technology, vol **19(8)**: 705-718.
- Taib, A.A., Boukhili, R., Achion, S. and Boukehili, A., (2006). Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints, International Journal of Adhesion & Adhesives, vol **26**: 237- 248.
- Taş B., İmak A. ve Solmaz M.Y., (2013). Basit ve Dalgalı Bindirme Bağlantılarında Kenar Yapıştırıcı Birikintisinin Bağlantı Mukavemetine Etkisi, 7th International Advanced Technologies Symposium (IATS'13), 30 October-1 November 2013, 418-422p., Istanbul, Turkey.
- Apalak M.K. and Davies R. (1994), Analysis and design of adhesively bonded corner joints: fillet effect, International Journal of Adhesion and Adhesives, **14**:163-174.
- Nemes, O., Lachaud F., (2010). Double-lap adhesive bonded-joints assemblies modeling, International Journal of Adhesion & Adhesives, **30**: 288–297.
- Solmaz M.Y., (2008). Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Analiz ve Tasarımları, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Solmaz M.Y., Turgut A.(2010). An Experimental and Numerical Study on the Effects of Taper Angles and Overlap Length on the Failure and Stress Distribution of Adhesively-Bonded Single-Lap Joints, The 1st International Symposium on Computing in Science & Engineering (ISCSE), June, **3-5**, 2010, 866-874 p., Kusadasi, Aydın.
- Aydın S., (2012). Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Prizmatik Geçmeli Bağlantıların Mekanik Analizleri, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Aydın S., Solmaz M.Y., Turgut A.(2011). 6 th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.

## Yemişlik Civarında (Elazığ Güneyi) Elazığ Magmatitleri'nin Mineralojisi ve Jeokimyasal Özellikleri

Dicle BAL AKKOCA, Sevcan KÜRÜM, Zülfü BAKIR

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye  
dbal@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 21.12. 2017; Kabul/Accepted: 10.09.2018)

### Özet

Bu çalışmada Elazığ İli'nin yaklaşık 5 km güneyinde Yemişlik civarında Üst Kretase Elazığ Magmatitleri'ne ait volkanik kayalardan alınan örneklerin jeokimyasal özellikleri çalışılmıştır. İnceleme konusu olan Elazığ Magmatitlerini oluşturan volkanitler; bazalt, andezit ve daha asidik karakterli dasit bileşimindeki lavlar ile bunların piroklastitlerinden oluşmaktadır. XRD incelemelerine göre volkanitlerde serizit (illit) ve klorit şeklinde alterasyon mineralleri tespit edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemelerine göre illitler çoğunlukla birbirine paralel, yer yer ışınal dizilimli ince-uzun filamentler biçiminde iken, kloritler ince ve kalın levhamsı şekilli olarak tespit edilmiştir. Zr/Y oranlarına göre, bazik bileşimli örnekler toleyitik magma özellikli, daha asidik örnekler ise toleyitik-kakalkali arasında geçiş göstermektedir. MORB'a ve Kondrite göre normalize nadir toprak element diyagramında örnekler yitim zonu magmatizması özelliği gösterdiği görülmüştür. Zr/Nb ve Ce/Zr ve Rb/Zr gibi iz element oranları, volkanitlerin oluşumunda fraksiyonel kristalleşme yanında, kabuksal kirlenme sürecinin de etkili olduğu göstermektedir. Yüksek La/Ta ve düşük Nb/La oranlarına sahip örneklerin litosferik mantodan türediği, La/Nb ve Ba/Nb oranlarına göre yay volkanitlerine uyduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yemişlik, Elazığ, Üst Kretase Elazığ Magmatitleri, XRD incelemeleri, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) incelemeleri, jeokimya.

## Mineralogy and Geochemical Characteristics Of Elazığ Magmatics Around Yemislik (East of Elazığ)

### Abstract

In this study, geochemical characteristics of volcanic rocks from Upper Cretaceous Elazığ Magmatites were studied, around Yemişlik which is situated about 8 km south of Elazığ. The volcanic rocks are composed of basalt, andesite and more acidic dacite and their pyroclastites. Sericite (illite) and chlorite alteration minerals were detected in volcanics. According to scanning electron microscope (SEM) examinations, illites are mostly thin and long filaments which are parallel to each other, whereas chlorites occur in thin or thick plates. According to the Zr / Y ratios, the basic samples show tholeiitic magma compositions, while the more acidic ones show the transition from tholeiitic to calcalkaline. In the MORB and Kondrite normalized multi-element diagram, the specimens show arc related magmatic features. The trace element ratios such as Zr / Nb and Ce / Zr and Rb / Zr show fractional crystallization, and the crustal contamination process is also effective in the formation of volcanics. High La / Ta and low Nb / La ratios of samples show that the volcanics were derived from lithospheric mantle, and it was found that the samples comply with arc volcanics according to the ratios of La / Nb and Ba / Nb.

**Keywords:** Yemişlik, Elazığ, Upper Cretaceous Magmatics, XRD investigations, Scanner electron microscopies, geochemistry.

### 1.Giriş

Elazığ İl'inin yaklaşık 5 km güneyinde yer alan Üst Kretase Elazığ Magmatitleri'ne ait altere volkanik kayalar bu çalışmanın ana konusunu oluşturmaktadır (Şekil 1). Üst Kretase

Magmatitleri doğuda Hakkari'den batıda Kahramanmaraş'a kadar Bitlis Sütur Zonu Kuşağı'nın kuzeyinde yer yer geniş yayılım göstermektedir [1]. İnceleme konusu olan Elazığ Magmatitleri bu magmatitlerin bir devamı olarak kabul edilmektedir.

Geniş yayılıma sahip olması ve Neo - Tetis'in evrimiyle bağlantılı olması dolayısıyla şimdiye kadar bu magmatitler üzerinde önemli çalışmalar yapılmıştır. Elazığ civarında da bu magmatitlerle ilgili ayrıntılı jeolojik, petrografik ve jeokimyasal çalışmalar mevcuttur [1-10]. Aktaş ve Robertson [3], Üst Kretase yaşlı kalkalkalen intrüzifler ile mafik volkanik-piroklastik kayalar ve sedimentlerin Yüksekova ensimatik ada yayı biriminin batıdaki devamı olduğunu belirtirler. Hempton ve Savcı [2] ise birimi etkin bir kıta kenarının magmasal ürünleri yerine ada yayı sistemine bağlı olan ilkel-ensimatik ada yayı olarak yorumlamıştır.

Bu görüşlerden farklı olarak Yazgan [1], Elazığ volkanik karmaşığı olarak incelediği birimi, Malatya-Elazığ arasında etkin kıta kenarı magmasal ürünleri olarak yorumlarken, daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda birim, ada yayı topluluğu olarak belirtilmiştir [11]. Görüldüğü üzere birimin oluşumu ile ilgili değişik görüşler ve Aktaş ve Robertson'ın [3] belirttiği "Volkanik Yay Kompleksi" gibi farklı isimlendirmeler mevcuttur. Bununla birlikte Elazığ civarında geniş yayılım sunan bu kayaç grubunun tüm kayaç ve kil minerallerinin tespiti daha önce yapılmamıştır. Yapılan X-ışınları difraktometri ve taramalı elektron mikroskop incelemeleri ilk defa bu çalışmada verilmiştir. Yemişlik ve çevresinden alınan Elazığ Magmatitleri'ne ait örnekler üzerinde yapılan jeokimyasal çalışmaların yanında kil minerallerinin tespiti de ilk defa bu çalışma ile ortaya çıkarılmıştır.

Metamorfite, Üst Kretase yaşlı Elazığ Magmatitleri, Harami Formasyonu, Orta Eosen-Oligosen yaşlı Kırkgeçit Formasyonu, Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Karabakır Formasyonu ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlardır (Şekil 2).

## 2. Jeoloji

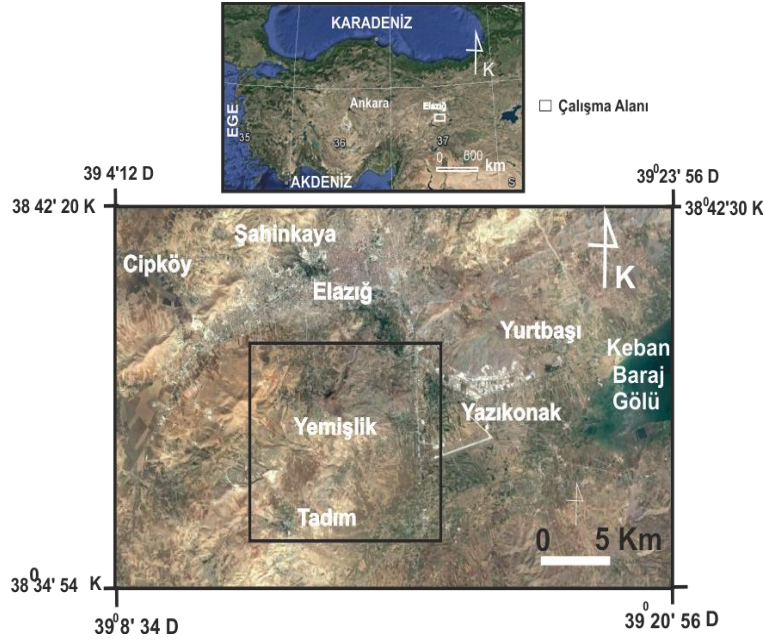
İnceleme alanında yüzeyleyen birimler yaşlıdan gence doğru Keban Metamorfite, Harami Formasyonu, Elazığ Magmatitleri, Kırkgeçit Formasyonudur.

Çalışma alanında yeralan Keban Metamorfite'nin dış yüzeyleri kırmızımsı

renkli, taze yüzeyleri ise grimsi beyaz renklidir (Şekil 3a). Sert ve dayanıklı yapıda mermer özelliğindeki kayalardan oluşmaktadır. Keban Metamorfite'nin yaşı Kipman [12] tarafından Permo-Karbonifer, Özgül [13, 14] tarafından ise Permo-Triyas olarak verilmiştir. İnceleme alanında Harami Formasyonu Tepeköy ve Tohumlu civarında yaygın olarak yüzeylenmektedir. Elazığ Magmatitleri'nin üzerinde masif kireçtaşları olarak bulunmaktadır (Şekil 3b). Harami Formasyonu Elazığ Magmatitleri'ni oluşturan adayı volkanizmasının etkin olmadığı Geç Maastrichtiyen'de dar sığ depolanma havzasında Elazığ Magmatitleri'nin üzerinde çökelmiş bir birim olarak kabul edilir [15]. Aynı bölgede Herece vd. [16] ve Herece [17] tarafından yapılan ayrıntılı çalışmalarda birim, geç Maastrichtiyen yaşlı olarak belirlenmiştir.

Kırkgeçit Formasyonu Yemişliğin güneyinde Altınçevre ve Sarıyakup civarında yüzeylenmektedir. Bu formasyonun litolojisi, sarımsı bej veya boz renkli olan kumtaşı çamurtaşı ardalanmasından oluşan fliš fasiyesinde gelişmiş olan kayalardan oluşmaktadır (Şekil 3c). İçerdiği fosil topluluğuna göre Turan [18], İbilioglu [19], Özkul ve Üşenmez [20] yaşını Orta-Üst Eosen olarak belirtmiştir. Elazığ ve çevresinde magmatitler üzerinde ayrıntılı petrografik ve petrolojik incelemeler yapan Bingöl [21], karmaşığın genel olarak gabro, diyorit, monzonit, tonalit ve granodiyorit gibi derinlik kayaları ile bazalt, andezit, dasit ve genellikle andezitik piroklastitler ve tüm bunları kesen granitik kayalar ve volkanosedimanlardan oluştuğunu belirtmiştir. Benzer şekilde Savcı [22] ile Turan ve Bingöl [23] de, Elazığ Magmatitlerinin tabanda gabro-diyorit bileşimli derinlik kayaları ve dasit dayklarından oluştuğunu belirtmiştir. Yine Turan ve Bingöl [23], birimdeki ortaç ve felsik dayklarca kesilen bazik volkanitler ve bunları üzerleyen piroklastik - volkanoklastik sediment stratigrafisine dayanarak, hem plütonik hem volkanik kayalardan ibaret birimi adayı topluluğu olarak kabul etmişlerdir.





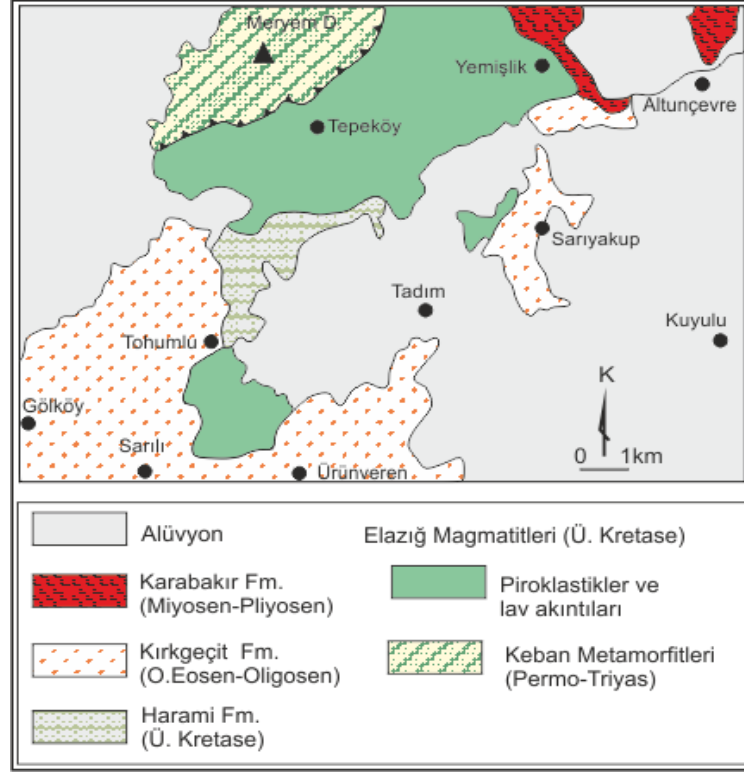
Şekil 1. İnceleme alanının yerbulduru haritası

İnceleme alanındaki magmatitler, kuzeyde Meryem Dağında yüzeyleyen Keban Metamorfite ile tektonik dokanak oluştururken diğer tüm birimlerle diskordan ilişkili olarak bulunmaktadır (Şekil 2). Harita alanı içerisinde volkanik kayalarla temsil edilen Elazığ Magmatitleri, Sarıyakup batısında daha çok yer yer ayrılmamış sivri küçük kafalar şeklinde lavlar, Yemişlik yakınlarında ise piroklastitler olarak bulunmaktadır (Şekil 3 d-e). Genellikle yoğun çatlaklı ve çok ayrılmış olan lavların, spilitik bazalt, andezit, dasit bileşiminde olduğu belirlenmiştir. Yastık lavlarda kalsit, klorit, epidot, zeolit gibi ikincil mineraller gözlenmiştir. Andezitik ve daha asidik bileşimli Elazığ Magmatitleri'ne ait kayalar yoğun alterasyondan dolayı daha yumuşak

topoğrafyalar oluşturmaktadır (Şekil 3f). Daha önce belirtildiği gibi bu birimin yaşı ile ilgili farklı görüşler mevcuttur. Perinçek [24], Turan ve Bingöl [23], Bingöl [21] birimin yaşı Üst Kretase ve/veya Senoniyen olarak değerlendirmişlerdir.

Karabakır Formasyonu harita alanında, Meryem Dağı doğu yamacında, Yemişlik Köyü kuzeyi ve doğu-güneydoğusu ile Altınçevre Köyü'nün kuzeyinde yayılım göstermektedir (Şekil 2).

Piroklastik istif ve lav akıntıları şeklinde yüzeylenmektedir. Bu bölgede Elazığ Magmatitleri piroklastikleri üzerinde bulunan Karabakır Formasyonu lav akıntıları koyu siyah renkli, sert, oldukça ince taneli bazaltik lavlardan oluşur.



Şekil 2. İnceleme alanının jeoloji haritası (Baykendi'den [25] değiştirilerek)

Sirel ve diğ. [26], Türkmen [27] birime Üst Miyosen yaşını önermiştir.

### 3. Materyal ve Yöntem

İnceleme alanında Yemişlik ve Sarıyakup civarındaki lavlar ve altere tüflerden örneklemeler yapılmıştır. Taze veya az altere lavlardan alınan örnekler üzerinde polarizan mikroskop, Yemişlik Köyü'nden alınan 9 örnekte (YE 1, 5, 7, 9, 11, 16, 20, 25, 29) X-ışınları difraktometri (XRD) çalışmaları ve 15 örnekte ICP analizi yapılmıştır.

Polarizan mikroskop incelemeleri örneklerin mineralojik bileşimlerinin saptanması ve dokusal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır.

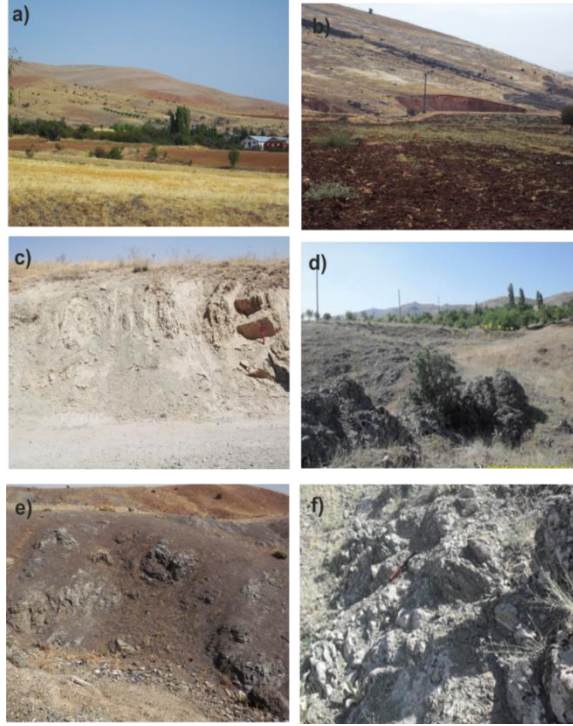
Taramalı elektron mikroskop incelemeleri (SEM) Fırat Üniversitesi Elektronik Mikroskop Laboratuvarında (FÜEMLAB) Jeol JSM-7001f

marka Field Emission marka elektron mikroskopta yapılmıştır.

Tüm kayaç fraksiyonu XRD çözümlemesi Bruker D8 Advance, Panalytical X'Pert Powder ve Philips PW 1830 marka model X-ışınları difraktometresinde (MTA) yapılmıştır.

Tüm kayaç bileşenleri Uluslararası Difraksiyon Veri Merkezi'nin (ICDD) 2004 yılı toz difraksiyon verilerinden yararlanarak çözümlenmiştir. Örneklerin major, iz element içerikleri ICP-AES ile, Nadir Toprak Elementleri (NTE)'ler ICP-MS ile ACME Analitik Laboratuvarında (Kanada) yapılmıştır. Ana, iz ve nadir toprak elementler 1150 °C'de platin-altın krozeeye 1/5 oranında numune ve lityumtetraborat ( $Li_2B_4O_7$ )

katılmasıyla elde edilmiş cam pelletlerde ICP-AES ve ICP-MS tekniği ile ölçülmüştür.



**Şekil 3.** (a) Kırmızımsı renkli Keban Metamorfitle’nden görünüm, (b) Tohumlu civarında gözlenen masif kireçtaşları özelliğindeki Harami Formasyonu, (c) Tadım’ın güneyinde yüzeylenen sarımsı bej veya boz renkli olan kumtaşı çamurtaşı araldanmasından oluşan Kırkgeçit Formasyonu, (d) ve (e) Sarıyakup ve Tohumlu civarında ayrıışmamış sivri küçük kafalar şeklinde yüzeylenen lavlardan görünüm, (f) Yemişlik civarında gözlenen dasitik bileşimli altere piroklastitler.

#### 4. Mineraloji-Petrografi

##### 4.1. XRD incelemeleri

Şekil 4a’da jeokimyasal olarak bazalt özelliği gösteren YE1 örneğine ait XRD tümkayaç ve kil fraksiyonu difraktogramı görülmektedir. Tüm kayaç çekimlerinde feldispat  $3.17 - 3.20 \text{ \AA}$ , kalsit  $3.01 \text{ \AA}$ , kuvars  $3.34 \text{ \AA}$ , piroksen  $4.45 \text{ \AA}$  daki pikleri ile tanınmıştır. Klorit minerali  $13.89 \text{ \AA}$  (001),  $7.01 \text{ \AA}$  (002),  $4.69 \text{ \AA}$  (0.03),  $3.52 \text{ \AA}$  (002),  $2.82 \text{ \AA}$  (005) pikleri ile tanımlanmıştır. İllit minerali  $10 \text{ \AA}$  (001),  $4.95 \text{ \AA}$  (002),  $2.55 \text{ \AA}$  (0.04) pikleri ile tanımlanmıştır (Şekil 4). YE 1, 9, 11, 23 örneklerinde yalnızca illit ve klorit mevcut iken, diğer örneklerde klorit mineraline rastlanılmıştır. Şekil 4b’de jeokimyasal olarak bazalt özelliği gösteren YE7 örneğinde feldispat, kalsit, kuvars, piroksen pikleri görülüyorken, kil fraksiyonunda yalnızca klorit görülmektedir.

Volkanitlerde gözlenen en yaygın alterasyonlar serizit (illit) ve klorittir. Kil fraksiyonunda bu iki mineralin bulunması magmatik bir kökene işaret etmektedir. Serizit (illit) oluşumu plajiyoklazların alterasyonu ile gerçekleşmektedir. Optik mikroskop incelemelerinde serizitleşmelere rastlanılmıştır. Serizitleşme (illitleşme) olayı alkali değişimini kapsamakta ve denizaltı volkanizması sırasında  $\text{K}_2\text{O}$  ilâvesini gerektirmekte veya K’lu kaynak kayalar (biyotit içeren) varlığında oluşturabilmektedir [28, 29]. Buna göre kayalarda plajiyoklazların alterasyonuna bağlı olarak  $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}$  azalması ve kütle kaybı,  $\text{K}_2\text{O}$  artışına bağlı olarak da serizitleşme meydana gelmektedir. Serizit (illit) oluşumu plajiyoklazların alterasyonu ile de gerçekleşmektedir [30, 31, 32].

Kloritler, tüm jeolojik zamanlarda ve ortamlarda, farklı kayaç gruplarında farklı mekanizmalar ile oluşabilen minerallerdir. Magmatik kayalarda trioktahedral mika ve

ferromagnezyen minerallerden itibaren bozunma (negatif dönüşüm veya degradasyon; ikincil) şeklinde oluşabilmektedir [33]. Optik mikroskop incelemeleri, kloritin mafik mineraller ve volkanik camın alterasyonu sonucu geliştiğini göstermektedir. Volkanik cam klorit dönüşümünün bir sulu MgFeAl-silikat jeli ara fazından geçerek gerçekleştiği bilinmektedir (volkanik cam + iyonlar → sulu MgFeAl-silikat jeli → klorit + su) [34].

Aynı şekilde Sipahi ve Sadıklar [35] Zigana (Gümüşhane, KD Tükiye) Volkanitleri'nin alterasyon mineralojisini incelemiş ve buradaki yay ortamında gelişmiş Geç Kretase andezit, bazalt ve dasitten oluşan kayalarda serizit illit mineraline rastlamışlardır. Araştırmacılar, serizit/illitlerin feldispatların alterasyon ürünü olduğunu belirtmişlerdir. Tetiker ve Yalçın [36] da Sivas-Ulaş havzasında yaptıkları çalışmada, Eosen yaşlı volkanik ve volkanosedimanlara bağlı olarak oluşmuş klorit ve illit minerallerine rastlamışlardır.

## 4.2.Petrografi

### 4.2.1.Taramalı elektron mikroskop incelemeleri

Ye7 örneğinde klorit mineralleri levhalar biçiminde kümecikler oluşturmaktadır (Şekil 5a-b-c-d). Illitler ise çoğunlukla birbirine paralel,

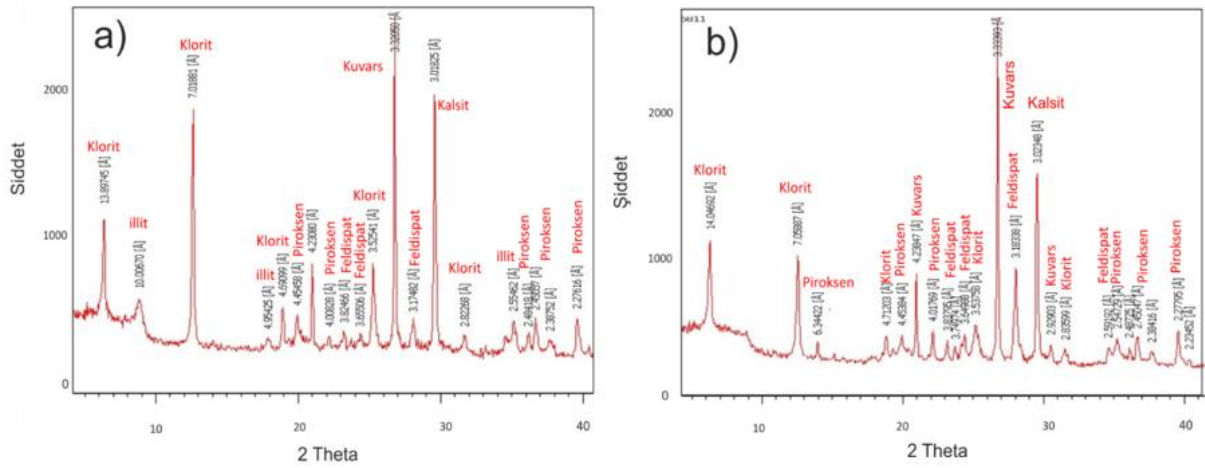
yer yer ışınal dizilimli ince-uzun filamentler (2-30 µm) biçimindedir (Şekil 5b-c-d).

### 4.2.2.Optik mikroskop incelemeleri

Bu çalışmada Yemişlik köyü çevresinde yüzeyleyen lavlardan alınan örneklerin mineralojik

bişimleri esas alındığında bazalt, bazaltik andezit, andezit ve dasit bişiminde olduğu belirlenmiştir. Bu kayalarda yapılan optik mikroskopik incelemeler aşağıda anlatılmıştır.

Bazaltlar, İntergranüler, intersertal, porfirik, amigdaler ve subofitik doku gibi farklı dokusal özellikler gösterirler (Şekil 6a). Esas olarak plajiyoklas, piroksen, olivin minerallerinden oluşmuş bu kayalarda, minerallerin bolluk ve şekilleri dokusal özelliklere bağlı olarak değişmektedir. Alterasyonun yaygın olduğu bu kayalarda, epidotlaşma, karbonatlaşma, killeşme, kloritleşme ve serpantinleşme gibi ikincil oluşumlarla beraber değişik oranlarda opak mineraller bulunur. Bazaltik andezitler, porfirik dokulu olup plajiyoklas ve piroksen minerallerinden oluşmuştur. Yoğun çatlaklı olan bu kayalarda, karbonat ve silis (kalsedon) oluşumları gözlenmiştir. Hiyalopilitik ve amigdoloyidal dokunun görüldüğü bu lavlarda farklı boyutlu ve genellikle elipsoidal gaz boşluklarında kalsit, epidot klorit gibi ikincil mineraller gelişmiştir (Şekil 6a, b).



Şekil 4. (a) YE1 ve (b) YE7 örneklerinin X-Işınları difraktometri grafiği

Genellikle porfirik doku gösteren andezitler plajiyoklas ve amfibol mineralinden oluşmuştur. Fenokristal ve mikrolitik boyutlarda olan plajiyoklas mineralleri kayacın esas mineralini oluşturmaktadır. Plajiyoklas fenokristalleri genellikle öz / yarı özşekilli prizmatik ve iri – orta tanelidir.

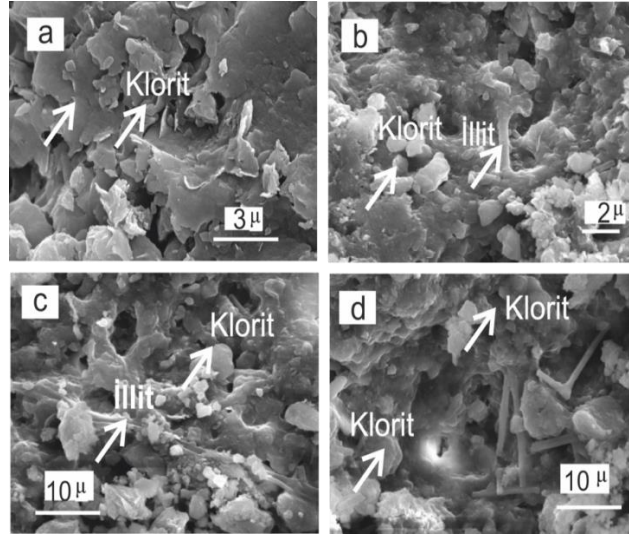
Çoğunlukla polisentetik ikizlenme, ve daha az oranda zonlu dokunun gelişmiş olduğu plajiyoklas fenokristallerinde killeşmeler tespit edilmiştir. Hornblend türünde olan amfiboller özşekilli-yarı özşekilli, çatlaklı ve genellikle opaklaşmıştır (Şekil 6c).

Bazen hornblendler tamamen opaklaşmış olduğundan psödomorf olarak bulunmaktadır. Kayaç genelinde çok yaygın olan opak mineraller özşekilsiz küçük kristaller halinde bulunmaktadır.

Mikroporfirik dokulu dasitlerde mikrolitik felsik minerallerden oluşmuş hamur malzemesinde plajiyoklas, kuvars, sanidin, biyotit ve amfibol fenokristal /mikrofenokristalleri bulunur (Şekil 6d).

Plajiyoklaslar, genellikle özşekilli fenokristal ve mikrolitik olarak, genellikle zayıf ikizlenmeli, yer yer zonlanma ve yoğun alterasyon göstermektedirler. Plajiyoklaslarda bazen serizitleşmelerle birlikte epidot kapanımları da görülmektedir. Bu kayaçlarda yaygın olarak bulunan kuvarslar, mikrolitik plajiyoklas öz şekilsiz, yuvarlaklaşmış ve kemirilmiş fenokristaller ve mikrokristaller halinde hamur malzemesinde bulunmaktadır.

Kayaçta az oranda bulunan sanidin, yarı öz şekilli fenokristaller halindedir. Biyotit ve amfibollerin oluşturduğu mafik mineraller, farklı



**Şekil 5.** (a) Levhamsı klorit kümeciklerinden görünüm, (b-c-d) Levhamsı kloritler ve illit filamentleri, Örnek No: Ye7 (Chl=Klorit, I=İllit).

boyut ve şekillerde ve az oranda bulunmaktadır. Kayaçlarda yer yer serizitleşme, epidotlaşma ve kloritleşme gibi ikincil bozunma ürünleri görülür.

## 5. Jeokimya

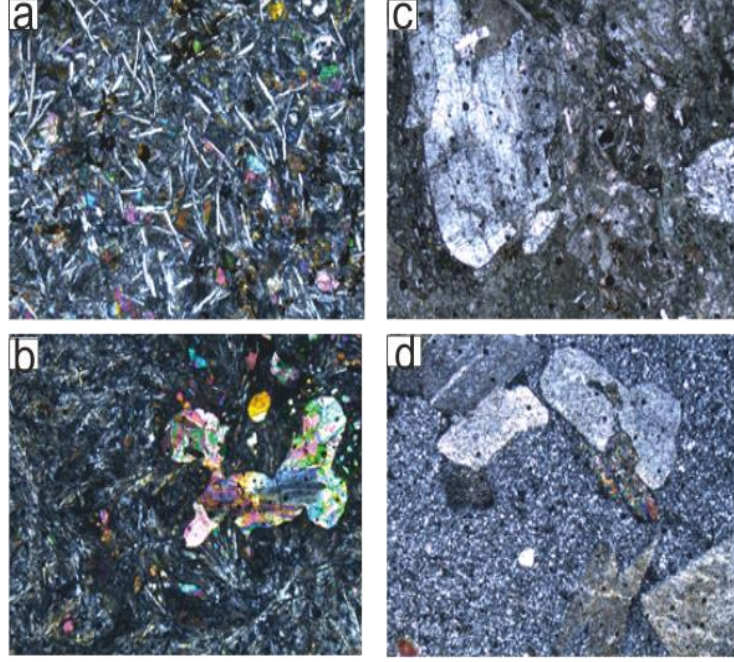
İnceleme alanından alınmış olan Üst Kretase yaşlı Elazığ Magmatitleri'nin jeokimyasal özelliklerini belirlemek için, tüm kayaç jeokimya analizlerine ait ana oksit ve iz element sonuçları

Tablo 1'de, nadir toprak element sonuçları ise Tablo 2'de verilmiştir.

Genel olarak örneklerin ateşte kayıp (Loss-on ignition, LOI) oranları % 4.4 - 17.5 arasında ve oldukça yüksek değerlerdedir. Jeokimyasal verilerde yüksek ateşte kayıp oranları, elementlerin alterasyondan etkilendiklerine işaret etmektedir. Alterasyonun kimyasal etkileri CaO, K<sub>2</sub>O, Rb ve Sr ile birlikte yüksek LOI ve Na<sub>2</sub>O içeriği şeklinde görülmektedir [37, 32]. Bu sonuçlar, petrografik incelemelerde kayaçlarda belirtilen değişen oranlardaki ayrışma

(karbonatlaşma, kloritleşme ve serizitleşme) etkisi ile uyumluluk göstermektedir. Kayaçlardaki  $\text{SiO}_2$  %43.89-70.59 arasında değişmektedir. Buna göre örnekler toplam alkali-silis içeriğine göre isimlendirildiğinde [38], değişen silis içeriğine göre dasit ve bazalt bileşimli olmak üzere iki farklı alanda yoğunlaşmışlardır (Şekil 7a). Bu sonuçların

petrografik verilerle uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak kayaçlardaki değişen oranlardaki ayrışmayı dikkate aldığımızda ve genel kabul görmesi açısından yüksek LOI değerlerine sahip örneklerin, ayrışma sürecinde daha az hareketli olarak kabul edilen Ti, Zr, Nb ve Y [38, 39] gibi elementlerin kullanıldığı diyagramda değerlendirilmelidir.



**Şekil 6.** Yemişlik köyü güneyi Sarıyakup civarındaki Elazığ Magmatitleri volkanitlerinin mikroskobik görünümleri. Tüm fotolar analize ışık görünümüdür. (a) Bazaltta plajiyoklas lataları ile birlikte olivin ve piroksen mikrofönokristallerinin görünümü, (b) Andezitte plajiyoklas fenokristalli migrogranüler porfirik doku (c) Veziküler ve amigdaler doku ile amigdaler dokuyu oluşturan epidot, klorit mineralleri görünümü, (d) Dasitte fenokristal ve mikrolitik hamur malzemesi ve alterasyondan etkilenmiş olan plajiyoklas fenokristalinin görünümü.

**Tablo 1.** İncelenen Üst Kretase yaşlı Elazığ Magmatitleri volkanitlerine ait örneklerin ana oksit (% ağırlık), ve iz elementlerinin (ppm) analiz sonuçları.

Örnek	YE1	YE5	YE7	YE9	YE11	YE14	YE16	YE17	YE20	YE22	YE23	YE25	YE26	YE27	YE29
$\text{SiO}_2$	49,39	43,73	43,89	47,27	52,41	66,93	70,59	46,70	47,79	43,67	69,20	51,77	47,00	45,34	48,26
$\text{Al}_2\text{O}_3$	15,70	16,14	18,03	15,87	17,63	14,01	13,97	16,09	14,97	15,13	14,47	14,18	14,65	14,40	16,24
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	10,41	7,97	8,32	8,22	8,55	3,74	3,65	7,44	7,53	7,34	3,53	7,71	8,64	8,50	7,87
$\text{MgO}$	3,68	3,98	4,40	3,45	3,65	1,32	1,38	3,04	3,10	3,38	1,15	3,85	4,44	4,31	3,25
$\text{CaO}$	6,23	9,66	8,23	7,97	3,89	2,70	0,53	8,69	9,29	10,36	0,81	7,10	8,32	9,88	6,82
$\text{Na}_2\text{O}$	0,54	0,63	1,73	1,24	1,92	2,16	1,07	1,12	1,07	0,77	0,24	1,16	0,99	1,04	0,72
$\text{K}_2\text{O}$	2,09	1,40	1,38	2,24	2,08	2,75	3,56	1,58	1,31	0,71	3,73	1,26	0,97	0,57	1,14
$\text{TiO}_2$	0,75	0,81	0,81	0,77	0,79	0,46	0,47	0,76	0,70	0,70	0,48	0,64	0,69	0,64	0,74
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,14	0,14	0,17	0,19	0,19	0,12	0,12	0,14	0,13	0,16	0,12	0,10	0,12	0,13	0,12
$\text{MnO}$	0,53	0,43	0,17	0,22	0,17	0,13	0,10	0,14	0,20	0,12	0,19	0,11	0,13	0,16	0,10
LOI	9,6	14,9	12,7	12,3	8,6	5,6	4,4	14,2	13,8	17,5	5,9	12,0	13,9	14,9	14,6

<b>Top.</b>	99,12	99,82	99,83	99,80	99,85	99,92	99,83	99,86	99,89	99,86	99,81	99,86	99,85	99,85	99,85
<b>Ni</b>	31,5	42,8	28,0	35,4	23,1	2,1	1,5	30,1	30,8	27,5	2,9	26,8	42,8	32,7	33,3
<b>Ba</b>	295	193	127	152	157	184	445	114	71	136	312	114	123	96	171
<b>Co</b>	21,8	29,0	25,9	26,9	18,6	6,1	3,4	19,8	20,6	24,0	6,3	20,0	26,8	22,0	19,1
<b>Cs</b>	0,7	1,2	1,4	0,5	0,4	0,2	0,3	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,4	2,1
<b>Ga</b>	14,9	15,9	15,3	15,0	16,0	13,6	13,0	13,8	13,2	13,8	13,6	12,3	13,3	12,6	13,5
<b>Hf</b>	2,1	1,8	2,3	2,2	2,4	3,8	3,5	2,3	2,4	2,3	3,8	2,0	2,2	2,0	2,2
<b>Nb</b>	3,1	3,1	3,0	3,4	3,9	4,0	3,7	4,0	3,5	3,9	3,7	3,2	3,2	3,1	3,4
<b>Rb</b>	40,0	29,0	24,7	39,9	30,4	46,1	47,1	26,9	23,0	14,7	51,6	21,5	19,2	10,1	29,2
<b>Sr</b>	59,7	89,9	138,5	94,8	101,7	82,3	40,1	115,0	72,9	143,9	26,1	115,6	111,3	138,0	135,6
<b>Th</b>	1,9	1,7	2,0	2,0	2,1	3,3	3,5	2,1	2,1	1,9	3,4	1,9	2,2	1,8	2,0
<b>U</b>	1,0	1,1	1,1	1,0	1,1	1,4	1,3	0,9	0,9	1,2	1,3	0,7	0,8	0,9	0,9
<b>V</b>	205	233	218	218	221	51	65	187	172	167	81	148	174	160	189
<b>Zr</b>	74,5	66,4	80,2	72,8	85,8	134,2	133,2	82,1	78,1	83,2	131,3	71,9	75,5	72,4	77,4
<b>Y</b>	21,4	21,3	20,8	19,1	22,2	27,0	25,0	20,4	21,2	23,2	26,0	18,9	19,7	20,1	18,8
<b>Cu</b>	577,6	27,5	53,3	58,3	22,4	33,8	46,3	38,8	34,8	41,1	33,4	28,6	36,1	37,9	42,6
<b>Pb</b>	3,7	4,2	3,0	26,3	6,0	5,3	53,2	4,6	2,7	2,1	501,9	6,9	2,8	2,1	1,9
<b>Zn</b>	5649	198	115	411	90	59	541	80	59	61	496	69	68	53	75
<b>Sc</b>	22	25	24	23	22	10	10	19	20	19	11	17	19	18	22
<b>La/Ta</b>	41	39	22	25	26,66	58	40,33	31,33	48	48,5	56,5	40	43,5	44,5	39,5
<b>Zr/Y</b>	3,48	3,11	3,85	3,81	3,86	4,97	5,32	4,02	3,68	3,58	5,05	3,80	3,83	3,60	4,11

Buna göre  $\text{SiO}_2\text{-Zr/TiO}_2$  diyagramında [40] benzer olarak bazik örneklerin bazalt, subalkali bazalt ve dasit alanında yoğunlaştığı görülür (Şekil 7b). Analiz verilerine göre subalkalin özellikte olduğu belirlenen örneklerin magma karakterini belirlemek için Y-Zr diyagramı [29] kullanılmıştır. Buna göre örneklerin Zr/Y oranları %2-7 arasında değişmekte olup, bazik bileşimli örnekler toleyitik magma özellikli iken daha asidik örneklerin ise toleyitik-kakalkali geçiş özelliği gösterdiği görülmektedir (Şekil 8).

Örneklerin majör ve bazı iz elementlerin  $\text{SiO}_2$ 'ye göre değişimleri Şekil 9'da verilmiştir. Bazik bileşimli kayalardaki pozitif ve negatif değişimler daha belirgindir.

Ana elementlerin genel değişimleri fraksiyonlaşmayı işaret etmektedir. CaO, MgO, MnO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  ile negatif yönde azalan bir eğilim görülmektedir (Şekil 9).  $\text{K}_2\text{O}$  ise pozitif yönde eğilim göstermektedir.  $\text{SiO}_2$  ile CaO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  azalması önemli ölçüde plajiyoklas ve piroksen ayrımlaşmasını yansıtmaktadır.

$\text{SiO}_2$ 'ye karşı  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , MgO ve MnO azalması biyotit ve amfibol ayrımlaşmasına işaret eder.  $\text{SiO}_2$ 'ye karşı Rb, Ba artması feldispatların ve amfibollerin ayrımlaşmasını ifade eder.  $\text{SiO}_2$  ile Ni ve Co negatif yönde değişmesi de bu elementlerin klinopiroksen yapısındaki Mg, Fe ve Al 'un yerini alması nedeniyle klinopiroksen ayrımlaşmasını destekler (Şekil 10) [41].

**Tablo 2.** İncelenen Üst Kretase yaşlı Elazığ Magmatitleri volkanitlerine ait örneklerin nadir toprak elementlerinin (ppm) analiz sonuçları

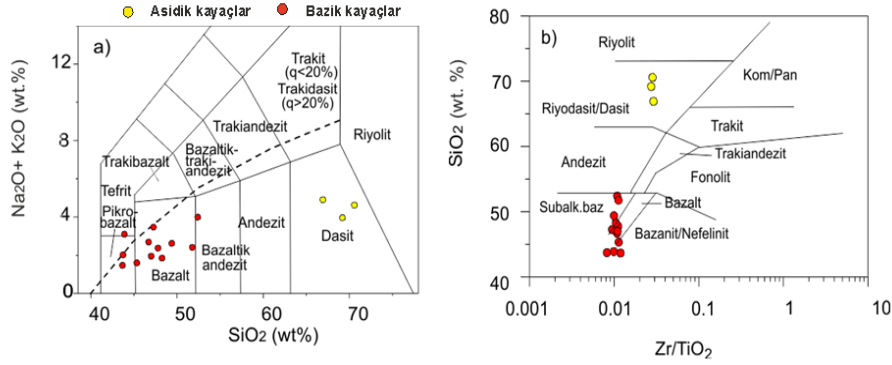
Örnek	YE1	YE5	YE7	YE9	YE11	YE14	YE16	YE17	YE20	YE22	YE23	YE25	YE26	YE27	YE29
<b>La</b>	8,2	7,8	6,6	7,5	7,7	11,6	12,1	9,4	9,6	9,7	11,3	8,0	8,7	8,9	7,9
<b>Ce</b>	16,5	15,0	14,4	15,0	15,8	23,9	22,8	18,6	19,1	19,4	23,0	16,7	17,8	19,0	15,0
<b>Pr</b>	2,36	2,15	2,09	2,09	2,30	3,21	3,34	2,61	2,71	2,76	3,27	2,31	2,61	2,61	2,16
<b>Nd</b>	11,0	10,1	10,6	9,6	10,8	13,5	13,7	11,6	12,3	12,6	13,9	10,3	11,5	11,0	10,3
<b>Sm</b>	2,59	2,59	2,69	2,48	2,84	3,19	3,18	2,98	3,10	3,08	3,22	2,53	2,65	2,70	2,45
<b>Eu</b>	0,87	0,87	0,83	0,80	0,81	0,99	0,85	0,91	1,00	1,02	0,89	0,88	0,93	0,95	0,84
<b>Gd</b>	3,28	3,13	3,12	2,88	3,31	3,85	3,62	3,24	3,31	3,50	3,61	3,02	3,04	3,10	2,74
<b>Tb</b>	0,59	0,56	0,56	0,50	0,59	0,68	0,63	0,55	0,59	0,62	0,66	0,51	0,55	0,55	0,49
<b>Dy</b>	3,75	3,43	3,55	3,21	3,66	4,31	4,05	3,63	3,62	3,91	4,25	3,39	3,33	3,60	3,45

Ho	0,85	0,86	0,88	0,73	0,88	0,99	0,94	0,77	0,84	0,86	0,96	0,71	0,76	0,77	0,75
Er	2,55	2,36	2,46	2,10	2,75	3,23	2,89	2,33	2,55	2,71	2,96	2,27	2,22	2,24	2,11
Tm	0,40	0,36	0,40	0,32	0,41	0,50	0,48	0,37	0,38	0,40	0,48	0,32	0,34	0,36	0,31
Yb	2,61	2,37	2,54	2,36	2,80	3,37	3,18	2,49	2,48	2,65	3,18	2,21	2,36	2,33	2,12
Lu	0,41	0,38	0,42	0,35	0,45	0,57	0,52	0,40	0,38	0,41	0,55	0,35	0,36	0,37	0,33

MORB'a normalize edilmiş çoklu element diyagramında, örneklerin genel olarak benzer dağılımlı olduğu görülmüştür (Şekil 11a). Bu da bu volkanitleri oluşturan kayaçların benzer manto kaynağından türediklerini belirtmektedir. Tüm örnekler Rb, Ba gibi büyük iyon yarıçaplı elementler (BİYE) ve Th, U gibi geçiş elementleri bakımından zenginleşmişken, Nb, Ta bakımından tüketilmişlerdir. Çoklu element

diyagramında ortaya çıkan bu dağılım, yitim zonu magmatizmasına uyar [42].

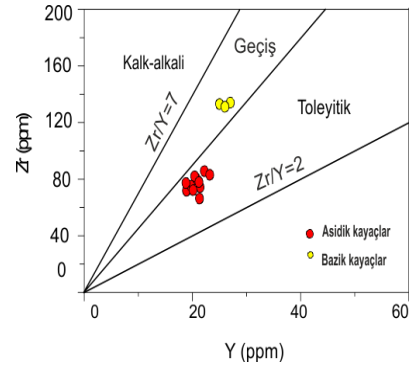
Ayrıca Rb ve Th elementlerinde görülen zenginleşmelerin kabuk kirlenmesinden kaynaklanmış olabileceğini gösterir. Kondrite normalize [43] nadir toprak element diyagramında bütün örneklerin element dağılımları benzerdir. Ancak dasitik/riyolitik bileşime sahip örneklerin



Şekil 7. Yemişlik çevresi Üst Kretase Magmatitleri'ne ait volkanik birimlerin (a) toplam alkali-silis [37], (b) SiO<sub>2</sub>-Zr/TiO<sub>2</sub> [40] diyagramlarındaki dağılımları.

Diyagramda, genel olarak tüm örneklerin hafif zenginleştiği, nadir toprak elementlerce özellikle de La ve Eu elementinde ise hafif bir tüketilme görülmektedir. La ve Ce zenginleşmeleri ana magmanın kabuk malzemesi Bilindiği gibi volkanitleri oluşturan ana magmadaki ayrımlaşma ve kısmi ergime gibi magmatik süreçlerin etkilerini birbirinden ayırt etmek oldukça zordur. Bunun için, jeokimyasal verilerin kullanıldığı diyagramlardan yararlanılmaktadır.

Bu amaçla Yemişlik çevresindeki volkanik kayaçların kökenini ve oluşumunda hangi magmatik süreç ve/veya süreçlerin etkili olduğunu belirlemek için oluşturulan ikili ve çoklu element diyagramlarıyla beraber modelleme yöntemlerinden de yararlanılmıştır.



Şekil 8. Elazığ Magmatitleri volkanik kayaçlarının Y-Zr diyagramındaki [29] dağılımı.

Yemişlik çevresi volkanik kayaçlardaki BİYE ve HNTE'lerinde gerçekleşen zenginleşmeler (Şekil 11), dalma-batma sürecinin etkisi, kabuksal kirlenme veya kaynak



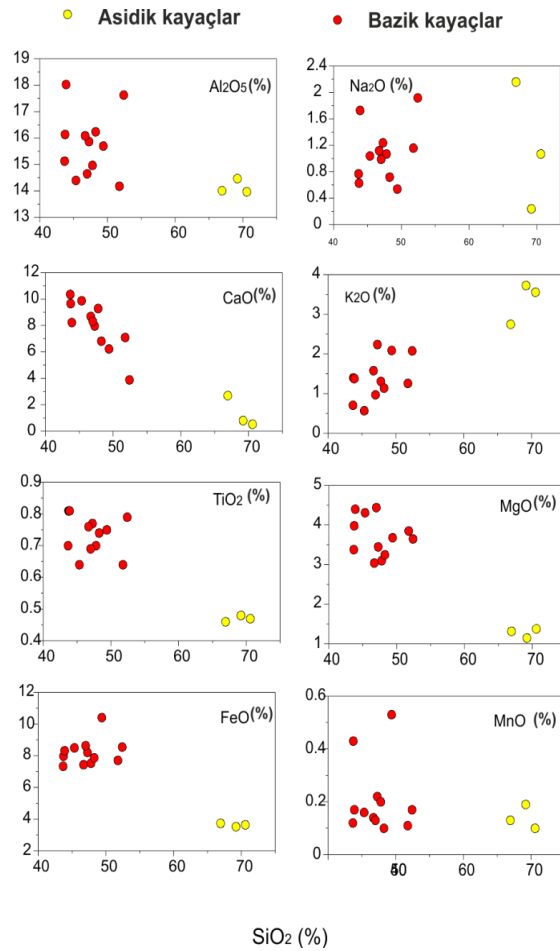
bölgesindeki düşük dereceli kısmi ergime olayları ile açıklanabilir [44]. Bu durum kaynak bölgesinde düşük dereceli bir kısmi ergime yada dalma-batma zonlarındaki kabuksal bileşenlerin etkisinden kaynaklanmıştır. Ayrıca bu volkanitlerin, ilksel bileşime yakın bazaltik kayalarındaki MgO (~%8 veya Mg sayısı %68-75), Ni (250-300/400 ppm), Cr (500-600/1000 ppm) [45] gibi bazı element değerleri ile uyumlu olmadığı görülmektedir (Tablo 1 ve 2).

Bu ise bu volkanitlerin, yitim zonu ortamlarında, yiten litosferin veya metasomatize olmuş üst manto kaynağının, belli şartlar altında, kısmi ergimesiyle oluştuğunu belirtmektedir [46].

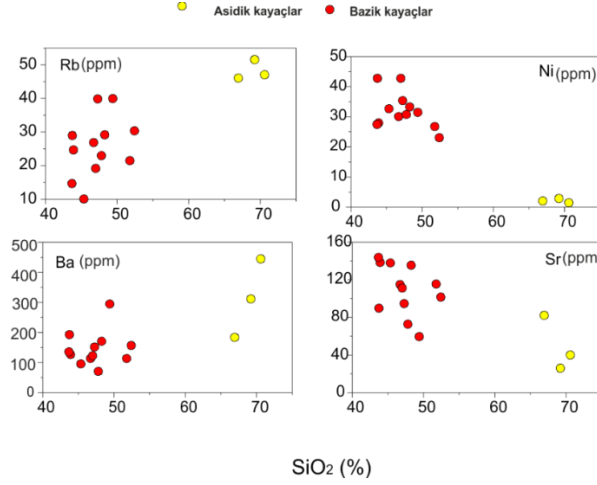
Şekil 9'da görüldüğü gibi bölgedeki volkanik kayaların oluşumunda, SiO<sub>2</sub> Harker diyagramlarında genel olarak fraksiyonel kristalleşme sürecinin etkili olduğu görülmüştür.

Bu tür değişim diyagramlarında gözlenen düzgün eğimler tek bir ana magma ve fraksiyonel kristalleşmeyi düşündürürken [47], örneklerinin nispeten dağınık halde bulunması, fraksiyonel kristalleşme yanında başka oluşum süreçlerinin de etkili olduğunu göstermektedir. Wilson'a [42] göre Zr/Nb ve Ce/Zr ve Rb/Zr gibi iz element oranları, kayaların oluşumunda fraksiyonel kristalleşme sürecinin olduğunu göstermektedir. Bu amaçla örneklerde bu element oranlarının Zr'a karşın Ce/Zr, Rb/Zr, Zr/Nb diyagramları çizilmiştir.

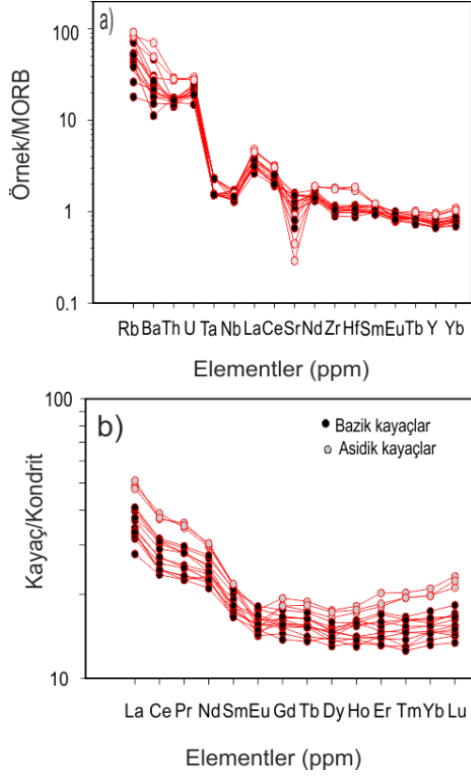
Volkanik kayalarda kaynak bölgesini belirlemek açısından astonesferden türeyen magmaların La/Ta içeriğinin yaklaşık 10 civarında olduğu kabul edilir.



Şekil 9. Elazığ Magmatitleri volkanik kayalarının major elementlerinin SiO<sub>2</sub> içeriğine göre değişim diyagramları.



Şekil 10. Elazığ Magmatitleri volkanik kayaların iz elementlerinin SiO<sub>2</sub> içeriğine göre değişim diyagramları.



Şekil 11. Elazığ Magmatitleri volkanik kayalarının MORB ve Kondrite normalize edilen çoklu element diyagramları. Normalleştirilme değerleri Sun and McDonough'dan [43] alınmıştır.

Benzer şekilde litosferik manto kaynaklarında Nb, Ta gibi HFSE'lerin LREE'lere göre tüketilmiş olduğu ve buna bağlı olarak Nb/La oranının litosferik mantoda düşük ( $\sim <0.5$ ), astenosferik manto kaynaklı OIB'lerde ise

bu oranın daha yüksek ( $\sim >1$ ) olduğu kabul edilir [49]. Buna göre volkanitlerin çoğunluğunun litosferik manto alanına düştüğü görülmektedir (Şekil 13). La/Yb-Nb/La oranlarının esas alındığı bu diyagramda ayrıca örneklerin düşük Nb/La ( $<0.5$ ) oranlarına bağlı olarak litosferik manto özelliği vermesine karşın, kaynaktaki metasomatik olaylara işaret eden La zenginleşmesi de görülmemektedir. Tüm bu veriler, bu kayaları oluşturan magmanın kabuksal kirlenme ile zenginleşmiş olduğunu göstermektedir.

İncelenen volkanitler okyanus ortası sırtı bazaltları (OOSB), OAB (ortalama okyanus adası bazaltı) ve kıtasal volkanitlerle karşılaştırıldığında yüksek La/Nb (2-6) ve Ba/Nb (30-287) oranlarına sahip olup, bu özellikleriyle yay volkanitlerine benzerlik sunarlar (Şekil 14).

Kampaniyen Alt Maastrichtiyen yaşını verdiği doğuda Hakkari'den başlayıp batıda gösteren magmatitleri Perinçek [24] tarafından Kahramanmaraş'a kadar yer yer değişiklikler incelemiş ve bunların ilkel okyanus içi (intra-oceanic) bir adayayı temsil ettiğini belirtilmiştir. Hempton ve Savcı [2] inceleme alanına yakın Sivrice-Diyarbakır Karayolu'nda Üst Kretase Magmatitleri'ne ait volkanitlerinin Elazığ volkanik karmaşığının tavanını, bölgede ada yayı volkanizmasının yüksek oranda farklılaşmaya (differentiation) uğramış, asitik son aşamasını olduğunu savunmuştur. Elazığ Volkanitleri'ni ilkel ensimatik adayayı volkanitleri olarak tanımlamıştır.

Ada yayı gelişimindeki ilk aşamada toleyitik bazalt, bazaltik andezit ve andezitlerin oluştuğunu, olgunlaşmış ada yaylarında önemli oranlarda farklılaşma sonucu oluşmuş kayaç toplulukları dasit, riyolit, riyodasit gibi kayaçların egemen olduğunu belirtmiştir. Yazgan [1] ise, Elazığ Volkanik Karmaşığı'nı, Malatya-Elazığ arasında etkin kıta kenarı magmasal ürünleri olarak yorumlamıştır.

Herece ve Acar [50] Elazığ ve kıtasal karakter sunan Baskil Magmatitleri'nin yaş ve kaya türü açısından benzer olduğunu birbirlerinin yanal eşdeğeri olduğunu, yay-magmatitleri Koniasiyen-Santoniyen Kampaniyen'de oluştuğunu ve geç Kampaniyen-erken Maastrichtiyen'de yay-kıta çarpışması olduğunu belirtmiştir.

Bingöl [21] ve Akgül [51] 'de , Elazığ Magmatitleri'nin kısmen okyanusal, kısmen de kıtasal kabuk üzerinde gelişen ada yayı ürünleri olduğunu ileri sürmektedirler.

Araştırmacılara göre Geç Kretase'de Anadolu-Arabistan Neotetis güney kolu açılmaya başlamış, Santonien-Kampanien 'de kuzeye doğru olan dalma batmaya bağlı birimler oluşmuştur

İnceleme konusu volkanitlerin de bu yitim zonuna bağlı olarak oluştuğu ve kabuk malzemesinden zenginleştiği düşünülmektedir. Bu İnceleme konusu volkanitlerin de bu yitim zonuna bağlı olarak oluştuğu ve kabuk malzemesinden zenginleştiği düşünülmektedir. Bu sonuçlar da Perinçek [24], Turan ve Bingöl [23], Bingöl [21] bulgularına uyum sağlamaktadır.

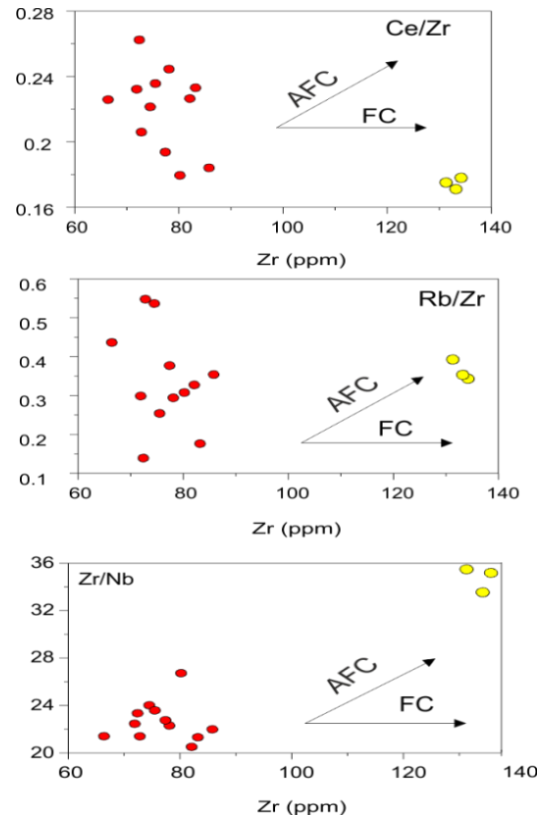
## 6. Sonuçlar

İnceleme alanındaki tüm veriler değerlendirildiğinde şu sonuçlara varılmıştır.

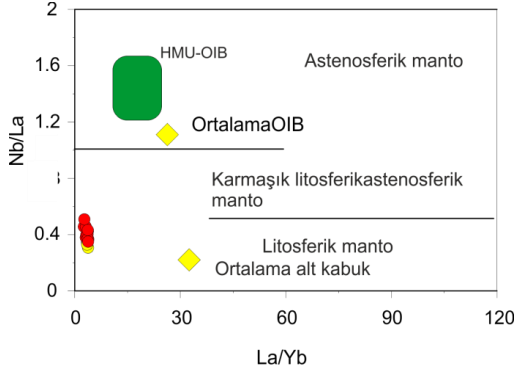
İnceleme konusunu oluşturan Elazığ Magmatitleri volkanitlerinin bazalt, andezit ve

daha asidik karakterli dasit bileşimindeki lavlar ile bunların piroklastitlerinden oluştuğu belirlenmiştir.

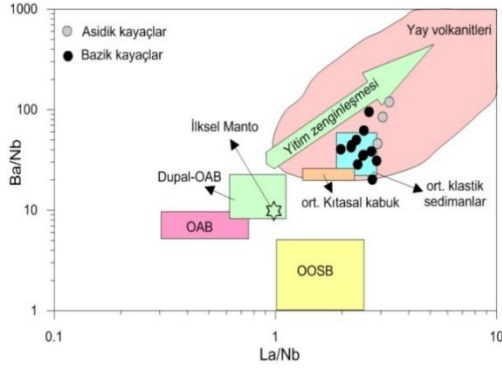
Yapılan XRD incelemelerine göre volkanitlerde serizit (illit) ve klorit şeklinde alterasyon minerallerine rastlanılmıştır. YE 1,9,11 ve 23 nolu örneklerde illit ve klorite rastlanılmış iken, diğer örneklerde yalnızca klorit minerali mevcuttur



**Şekil 12.** İnceleme alanındaki volkanitlerin Zr'a karşı Zr/Nb, Ce/Zr ve Rb/Zr element oranlarına göre asimilasyon ve fraksiyonel kristalleşme etkisini gösteren diyagramlar. FC; Fraksiyonel kristalleşme, AFC; Asimilasyon-fraksiyonel kristalleşme. Simgeler Şekil 10 gibidir.



**Şekil 13.** Örneklerin Nb/La-La/Yb diyagramında dağılımı [52]. HIMU: yüksek U/Pb oranlı manto (yüksek  $\mu$  değeri), OIB: Okyanus ada bazaltları Simgeler Şekil 10 gibidir.



**Şekil 14.** Örneklerin La/Nb a karşı Ba/Nb diyagramında dağılımı [53]. OAB: ortalama okyanus adası bazaltı, OOSB: Okyanus ortası sırtı bazaltları. Yay volkanitleri alanı [54], İlksel manto değeri [55], ort. kıtasal kabuk değeri [56] ve [57], OOSB ve OAB alanları [58]'den alınmıştır.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmalarında illitler çoğunlukla birbirine paralel, yer yer ışınal dizimli ince-uzun filamentler biçiminde iken, kloritler ince ve kalın levhamsı şekillidirler. Yemişlik örneklerinin petrografik incelemelerinde bazalt, andezit ve dasit, jeokimyasal bileşime göre bazalt, bazaltik andezit ve dasittir. İnceleme alanındaki volkanitlerin gelişiminde piroksen, hornblend, plajiyoklas ayrışması saptanmıştır.

MORB'a göre Rb, Ba, Th, U gibi elementlerin zenginleşmesi Nb, Ta bakımından tüketilmesi, Kondrite göre La, Ce zenginleşmesi yitim zonu volkanik kayaları özelliği sunar ve

aynı zamanda ana magmanın kabuk malzemesi ile kirlendiğine işaret eder

La/Ta, Nb/La oranlarına göre örneklerin astenoferik bir kaynaktan ziyade litosferik manto özelliği gösterdiği de ortaya çıkarılmıştır.

La/Nb ve Ba/Nb oranları, inceleme konusu volkanitlerin yay volkanitlerine benzerlik sunduğunu göstermiştir. Buna göre, incelenen volkanitlerin kaynağı yitim sonucu metasomatizmaya uğramış ve zenginleşmiş litosferik mantodur denilebilir.

## 7. Katkı Belirtme

Bu çalışma MF. 14.09 nolu Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (FÜBAP) tarafından desteklenmiştir. Makalenin incelenmesi sırasında yapmış oldukları katkılarından dolayı hakemlere teşekkürlerimizi sunarız.

## 8. Kaynaklar

1. Yazgan, E. (1981). Doğu Toros'larda etkin bir paleokıta kenarı etüdü (Üst Kretase- Orta Eosen), Malatya-Elazığ, Doğu Anadolu. *Yerbilimleri*, **7**: 83-104.
2. Hempton, M.R., Savcı, G. (1982). Elazığ volkanik karmaşığının jeolojik, yapısal özellikleri. *TJK Bülteni*, **25(2)**: 143-151.
3. Aktaş, G. and Robertson, A.H.F. (1984). The Maden complex, SE Turkey: evolution of a Neotethyan continental margin. *Geological Society of London*, **17**: 375-402.
4. Yazgan, E., Chessex, R. (1991). Geology and tectonic evolution of the southeastern Taurides in the region of Malatya. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, **3**: 1-42.
5. Rızaoğlu, T., Parlak, O., İşler, F., Höck, V. (2005). Geochemistry and tectonic significance of the cumulate rocks of the Kömürhan ophiolite in southeast Anatolia (Elazığ-Turkey). *Proceedings of the International Symposium*, D. Stumbea (Editörler) Romania, 35-38.
6. Parlak, O. (2006). Geodynamic significance of granitoid magmatism in the southeast Anatolian orogen:
7. geochemical and geochronological evidence from Göksun- Afşin (Kahramanmaraş, Turkey) region. *International Journal of Earth Sciences*, **95**: 609-627.
8. Robertson, A.H.F., Usta, Mer, T., Parlak, O., Ünlügenç, U.C., Taşlı, K and İnan, N. (2006).

- The Berit transect of the Tauride thrust belt, S Turkey: Late Cretaceous-Early Cenozoic accretionary/collisional processes related to closure of the Southern Neotethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, **27**: 108-145.
9. Ural M., Göncüoğlu M.C., Arslan M., Tekin U.K. and Kürüm S. (2014). Petrological and paleontological evidence for generation of a arc-back arc system within the closing southern branch of Neotethys during the Late Cretaceous. 20th CBGA Congre, A. Begiraj et al. (Editörs), Albania, 51-54.
  10. Kürüm, S., Tanyıldızı, Ö. (2017). Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of Upper Cretaceous (calc-alkaline) and Miocene (alkaline) volcanic rocks: Elazığ, Eastern Taurides, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, **134**: 332-344.
  11. Turan, M, Aksoy E ve Bingöl A.F. (1995). Doğu Toroslar'ın jeodinamik evriminin Elazığ civarındaki özellikleri. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, **7(2)**: 177- 199.
  12. Kipman, E. (1976). Keban'ın jeolojisi ve volkanitlerinin petrolojisi. Doktora tezi İstanbul Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, 91s.
  13. Özgül, N. (1976). Toroslar'ın bazı temel jeoloji özellikleri. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, **19(1)**: 65-78.
  14. Çelik H. (2003). Mastar Dağı (Elazığ GD'su) Çevresinin Stratigrafik ve Tektonik Özellikleri Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 95s.
  15. Aksoy, E. (1993). Elazığ batı ve güneyinin genel jeolojik özellikleri. *Turkish Journal of Earth Sciences*, **2**: 113-123.
  16. Herece, E., Akay, E., Küçümen, Ö. ve Sarıaslan, M. (1992). Elazığ-Sivrice Palu dolaylarının Jeolojisi. MTA Raporu, Rapor No: 9634
  17. Herece, E. (2008). Doğu Anadolu Fayı (DAF) atlası, MTA Özel Yayın Serisi-13, Ankara.
  18. Turan, M. (1984). Baskil-Aydınlar yöresinin stratigrafisi ve tektoniği. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , 180s.
  19. İbilioğlu D. (2010). Bağlarca (Elazığ GB'sı) yöresindeki eosen istifinin ostrakod içeriği ve ortamsal yorumu, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi **23**: 59-70.
  20. Özkul, M., Üşenmez, S. (1986). Elazığ kuzeydoğusunda derin deniz konglomeralarının sedimantolojik incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **1(2)**: 53-57.
  21. Bingöl, A. F. (1988). Petrographical and petrological features of the intrusive rocks of Yüksekova Complex in the Elazığ region (Eastern Taurus- Turkey). *Journal of Fırat University*, **3(2)**: 1-17.
  22. Savcı, G. (1980), Doğu Anadolu volkanizmasının neotektonik önemi: Yeryuvarı ve insan, **5(3-4)**: 46-49.
  23. Turan, M. ve Bingöl, A.F. (1991). Kovancılar-Baskil (Elazığ) arası bölgenin tektono-stratigrafik özellikleri. Ahmet Acar Jeoloji Sempozyumu Bildirileri, C.Yetis (Editör), Adana, 211-226.
  24. Perinçek, D., 1979, Geological investigation of the Çelikhhan-Sincik-Koçalı area (Adıyaman province): İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Mecmuası, **44**: 127-147.
  25. Baykendi, O. (1998). Tadım, Dedeyolu, Badempınarı (Elazığ) köyleri ve çevresinin jeolojisi ve magmatik kayaların petrografik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 70s.
  26. Sirel, E. Metin, S. ve Sözeri, B. (1975). Palu (KD Elazığ) denizel Oligosenin stratigrafisi ve mikropaleontolojisi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, **18(2)**: 175-180.
  27. Türkmen, İ. (1991). Elazığ Doğusunda Çaybağı Formasyonu (Üst Miyosen Pliyosen?) stratigrafisi ve sedimantolojisi. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, **34**:45-53.
  28. Barrett, T.J., Cattalani, S. and MacLean, W.H. (1993). Volcanic lithochemistry and alteration at the delbridge massive sulphide deposits, Noranda Quebec, *Journal of Geochemical Exploration*, **48**: 135-173.
  29. Barrett, T.J., MacLean, W.H. (1994). Mass changes in hydrothermal alteration zones associated with VMS deposits in the Noranda area. *Exploration and Mining Geology*, **3**:131-160.
  30. Date, J., Watanabe, Y. and Saeki, Y. (1983). Zonal alteration around the Fukazawa Kuroko deposits, Akita Prefecture, northern Japan. *Economic Geology Monograph*, **5**: 365-386.
  31. Eastoe, C.J., Solomon, M. and Walshe, J.L. (1987). District-scale alteration associated with massive sulfide deposits in the Mount Read Volcanics, western Tasmania, *Economic Geology*, **82**: 1239-1258.
  32. Large, R.R., Allen, R.L., Blake, M.D. and Herrmann, W. (2001). Hydrothermal alteration and volatile element halos for the Rosebery K. Lens Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposit, Western Tasmania. *Economic Geology*, **96**:1055-1072.
  33. Millot, G. (1970). *Geology of clays*. Springer-Verlag, New York, 429s.
  34. Tetiker, S., Yalçın, H. ve Bozkaya, Ö. (2015). Karakaya Karmaşığı'nın düşük dereceli metamorfik tarihçesine klorit mineralojisi ve jeokimyası ile yaklaşımlar. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, **58(2)**:55-83.

35. Sipahi, F., Sadıklar, B. (2010). Zigana (Gümüşhane, KD-Türkiye) volkanitlerinin alterasyon mineralojisi ve kütle değişimi. Türkiye Jeoloji Bülteni, **53(2-3)**: 97-128.
36. Tetiker, S., Yalçın, H. (2017). Alteration mineralogy of Eocene volcanic and volcanoclastic rocks from Sivas basin in Turkey. Lithology and Mineral Resources, **52(6)**: 522-538.
37. Floyd, P.A., Winchester, J.A. (1975). Magma type and tectonic setting discrimination using immobile elements. Earth and Planetary Science Letters, **27**: 211-218.
38. McLennan, S. M. and Taylor, S. R. (1991). Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trend. Journal of Geology, **99**: 1-21.
39. Pearce, J. A., Cann, J. R. (1973). Tectonic setting of basaltic volcanic rocks determined using trace element analysis. Earth Planet Science Letter **19**: 290-300.
40. Winchester, J.A., Floyd, P.A. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, **20**: 325-343.
41. Aydınçakır, E. (2017). Taşhyayla (Çaykara, Trabzon, KD Türkiye) civarı Geç Kretase yaşlı kalk-alkali volkanik kayaların petrografik ve Jeokimyasal Özellikleri, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, **7 /1**:51-78.
42. Wilson, M. (1989). Igneous Petrogenesis. A Global Tectonic Approach. Chapman and Hall, London, 466s.
43. Sun, S.S., McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society of London, **42**: 313-345.
44. Pearce, J.A., Bender, J.F., DeLong, S.E., Kidd, W.S.F., Low, P.J., Güner, Y., Şaroğlu, F., Yılmaz, Y., Moorbath, S. and Mitchell, J.G. (1990). Genesis of collision volcanism in Eastern Anatolia, Turkey. Journal of Volcanology and Geothermal Research, **44**: 189-229.
45. Best, M.G. (2006). Igneous and metamorphic petrology, Blackwell, USA, 728p.
46. Peacock, S.M. (1990). Fluid processes in subduction zones. Science, **248**: 329-337.
47. Peccerillo, A., Dallai, L., Frezzotti, M. L. and Kempton, P. D. (2004). Sr-Nd-Pb-O isotopic evidence for decreasing crustal contamination with ongoing magma evolution at Alicudi volcano (Aeolian Arc, Italy): implication for style of magma-crust interaction and mantle source compositions. Lithos, **78**: 217-233.
48. Thompson, R.N., Morrison, M.A. (1988). Asthenospheric and lower lithospheric mantle contributionsto continental extensional magmatism: an example from the British Tertiary Province. Chemical Geology, **68**:1-15.
49. Smith, D.R., Noblett, J., Wobus, R.A., Unruh, D. and Chamberlain, K.R. (1999). A review of the Pikes Peak batholith, front Range, central Colorado: a "type example" of Atype granitic magmatism. Rocky Mountain Geology, **34**:93-116.
50. Herece, E.İ., Acar, Ş. (2016). Upper Cretaceous-Tertiary geology/stratigraphy of Pertek and its vicinity (Tunceli, Turkey). Bulletin of Mineral Research and Exploration, **153**: 1-44.
51. Akgül, B. (1993). Piran (Elazığ) köyü çevresindeki magmatik kayaların petrografik ve petrolojik özellikleri, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 128s.
52. Kaygusuz, A., Aslan, Z., Siebel, W. and Şen, C. (2011). Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of post-collisional calc-alkaline volcanics in the Eastern Pontides (NE Turkey). Turkish Journal of Earth Sciences, **2**: 137-159.
53. Jahn, B.M., Wu, F.Y., Lo and C.H. (1999). Crustmantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional maficultramafic intrusions of the northern Dabie Complex, Central China, Chemical Geology, **157**: 119-146.
54. Jahn, B.M., Zhang, Z.Q. (1984). Archean granulite gneisses from eastern Hebei Province, China: rare earth geochemistry and tectonic implications. Contribution to Mineralogy and Petrology, **85**: 224-243.
55. Sun, S.S., McDonough, W.F. (1989). Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J., Eds., Magmatism in the Ocean Basins, Geological Society, London, Special Publications, **42**: 313-345.
56. Taylor, S.R., McLennan, S.M. (1985). The Continental Crust, Its Composition and Evolution. Blackwell, Oxford, 312s
57. Condie, K.C. (1993). Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. Chemical Geology, **104**: 1-37.
58. Le Roex, A.P. (1987), "Source regions of mid-ocean ridge basalts; evidence for enrichment processes" in: Mantle Metasomatism, Menzies, , (Editor) Hawkesworth, C.J., Academic Press, London, 389-422.

## Tabakalı Kompozitlerin Gerilme Analizi Üzerinde Doğrusal Olmayan Malzeme Davranışının Etkisi

**Mete Onur KAMAN**

Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, 23119, Elazığ, Türkiye  
mkaman@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 24.01.2018; Kabul/Accepted: 28.03.2018)

### Özet

Kompozit malzemeler genellikle çekme yükü altında doğrusal davranış gösterirler. Ancak ince kesitli dokuma fiber kompozitler kısmen de olsa doğrusal olmayan davranış gösterebilmektedir. Bu çalışmada, üniform çekme yükü altında tabakalı ince dokuma cam/epoksi kompozit levhaların çekme testi sonucu gerilme-şekil değiştirme davranışı deneysel olarak elde edilmiştir. Elde edilen doğrusal olmayan kuvvet-yer değiştirme grafikleri sayısal çözümler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, fiber takviye açısının kuvvet-yer değiştirme grafiğine etkisi, doğrusal olmayan malzeme davranışı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Fiber takviye açısının 0°'den farklı olduğu durumlar için her bir açıdaki malzeme, programa yeni bir malzemeymiş gibi girilmiş, düzlem mühendislik sabitleri hesaplanmış ve deneysel gerilme-şekil değiştirme davranışı ayrıca tanımlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tabakalı Kompozitler, Doğrusal Olmayan, Gerilme Analizi, Sonlu Elemanlar Metodu, Hasar Analizi

### Effect of Non-linear Material Behavior on Strees Analysis of Laminated Composites

#### Abstract

Composite materials generally show linear behavior under tensile load. However, thin-section woven fiber composites may show nonlinear behavior in part. In this study, tensile stress-strain behavior of layered woven glass/epoxy composite plates under uniform tensile load was experimentally obtained. The obtained nonlinear force-displacement graphs are compared with numerical solutions. In addition, the effect of the fiber reinforcement angle on the force-displacement graph is investigated numerically using non-linear material behavior. In cases where the fiber reinforcement angle is different from 0°, the material has been entered to the program as if a new material for each angle, plane engineering constants have been calculated and the experimental stress-strain behavior has been also defined.

**Keywords:** Laminated Composites, Non-Linear, Stress Analysis, Finite Element Method, Failure Analysis

#### 1. Giriş

Günümüzde fiber takviyeli kompozit malzemelerin uygulama alanları havacılık, savunma, otomotiv ve deniz endüstrisinde hızla artmaktadır. Dolayısıyla kompozitlerin farklı yüklemeler altında mukavemetinin bilinmesi bu noktada oldukça önemli hale gelir. Mekanik performans için fiber takviyeli kompozit malzemelerle ilgili farklı deneysel ve sayısal çalışmalar bulunmaktadır. Sayısal analiz, deneysel çalışmalara göre daha pratik, ucuz ve hızlıdır. Bununla birlikte ideal ve gerçekçi analizler için kompozitlerin malzeme davranışı doğru tanımlanmalıdır. Kompozit malzemelerin aksine çelik, alüminyum gibi geleneksel homojen malzemeler akma sonrası doğrusal olmayan

malzeme davranışlarına sahiptir. Çekme doğrultusunda yönlendirilmiş özellikle karbon, grafit gibi fiberlere sahip kompozit malzemeler ise genellikle doğrusal malzeme davranışı gösterirler. Ancak her tabakasında farklı fiber yönlenme açılarına sahip, ince kesitli cam fiber kompozitlerin malzeme davranışı tam olarak doğrusal değildir. Bu doğrusal olmayan gerilme şekil değiştirme ilişkisi kaba çözümler için tasarımcı tarafından doğrusal olarak alınabilir ve bu analizlerin sonuçlarından ortaya çıkan farklar göz ardı edilebilir. Bununla birlikte, doğrusal olmayan malzemelerin gerçek davranışının tanımlanması hassas analiz ve çözümler için çok önemlidir.

Doğrusal olmayan davranışın fiber takviyeli kompozitlerde elasto-plastik özelliklere [1-3], hasar mekaniğine [4] ve plastik gerilme davranışına [5], kırılma mekanizmasına [6] ve darbe performansına [7] etkileri üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Ryou vd. [8] doğrusal olmayan ve hız bağımlı asimetrik/anizotropik deformasyon davranışlarına odaklanan dokuma kompozitlerin mekanik performansını analiz etmiştir. Dokuma kompozitlerin mekanik davranışını gerçekçi bir şekilde modelleyebilmek için üç temel özellik belirlemişlerdir: çekme ve basma arasındaki asimetrik malzeme davranışı, anizotropik ve doğrusal olmayan oluşum ve hız bağımlılığı. Goyal vd. [9] ortotropik malzemeler için *Hill* akma fonksiyonuna dayanan iki boyutlu sonlu elemanlar modelini kullanarak örgülü kompozitlerin lineer olmayan davranışlarını incelemiştir. Analizlerde, çeşitli kompozitlerin gerilme-şekil değiştirme davranışları deneysel veriler ile karşılaştırarak doğrulanmıştır. Xie ve Adams [10] tarafından tek yönlü kompozit malzemelerin plastik tepkisini tanımlamak için basit bir üç boyutlu plastisite modeli geliştirilmiştir. Modeldeki ortotropik parametreler, çeşitli deneysel yükleme koşullarına tabi tutulan kompozitlerin gerilme-şekil değiştirme tepkimelerinden belirlenmiştir. Plastisite modelini kullanan üç boyutlu sonlu elemanlar analizi, modelin uygulaması amacıyla kompozit malzemelerin basma ve kısa kiriş kayma testlerini modellemek için kullanılmıştır. Carvalho vd. [11] kompozit malzemeler için 2 x 2 twill desenli birim hücre sayısal modelini geliştirmiştir. Çalışmada matrisin elasto-plastik tepkisi ve fiber/matris ayrılma olasılığı modellenmiş ve maksimum gerilme ve fiziksel temelli hasar modelleri kullanılmıştır. Goldberg vd. [12] malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışını kullanan, hem katı hem de kabuk elemanlar ile kullanılmak için uygun bütünleşik bir plastisite ve hasar modeli geliştirmiştir. Salami vd. [13] yüksek dereceli sandviç panel teorisini kullanarak bilineer elasto-plastik yapısal davranışa sahip sandviç kirişin çekirdeğinde transvers normal ve kayma gerilmelerini araştırmıştır. Çeşitli tabakalı kompozitlere uygulanabilen, elyaflı tabakalı kompozitin nihai hasara kadar termo mekanik davranışını veren genel bir bağıntı Huang [14] tarafından sunulmuştur. Bağıntı; *Klasik Tabaka Teorisi*'nin,

mikromekanik model ve tabakalı analiz ile birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Batra vd. [15], düşük hızlı darbe etkisi altında fiber takviyeli polimerik tabakalı kompozitlerin 3 boyutlu elasto-plastik davranışlarını hasar başlaması, ilerlemesi ve nihai hasar şeklinde ayrı ayrı incelemiş ve hesaplanan sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmıştır. Anizotropik elasto-plastisite teorisini benimseyen tabakalı kompozitler üzerinde düşük hızlı darbe etkisine bağlı kalıcı deformasyonu belirlemek için bir yöntem He vd. [16] tarafından önerilmiştir. Paccola vd. [17], kompozit malzemeleri ve yapıları orta ve makro düzeyde analiz etmek için sonlu elemanlar formülasyonlarının geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamıştır. Vyas vd. [18] yarı-statik yüklemelerde tek yönlü tabakalı polimer fiber takviyeli kompozitlerin tam doğrusal olmayan mekanik tepkisini doğru bir şekilde temsil edebilen bir yapısal model sunmuştur.

Bu çalışmada, üniform çekme yükü altında tabakalı ince dokuma cam/epoksi kompozit levhaların çekme testi sonucu gerilme-şekil değiştirme davranışı deneysel olarak elde edilmiştir. Doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranış verileri kullanılarak gerilme analizi, sonlu elemanlar analiz paket programı *ANSYS*'de yapılmıştır. Elde edilen doğrusal olmayan sayısal kuvvet-yer değiştirme grafikleri, doğrusal sayısal ve analitik malzeme davranışı sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Son olarak, çekme yükü altında fiber yönlendirme açısının kuvvet-yer değiştirme grafiğine etkisi, doğrusal olmayan malzeme davranışı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

$N_x$  (N/mm) düzgün yayılı yükü altında, fiber takviyeli, kalınlığı  $t$  (mm) olan, deneysel ve sayısal analizlerde kullanılmak üzere hazırlanan tabakalı kompozit levha Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu levha için gerilme şekil değiştirme ilişkisi

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

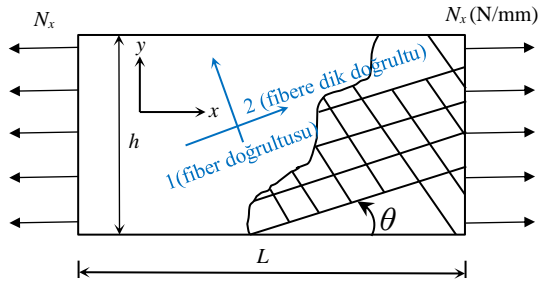
şeklinde yazılabilir. Burada  $N_x$  (N/mm) birim uzunluk başına düşen yük miktarını tanımlar ve



gerilme durumunda olduğu gibi  $x$  yönünde etki eder. Çekme testi için  $N_x = N_y = 0$ 'dır.  $\varepsilon_x^0$ ,  $\varepsilon_y^0$  and  $\gamma_{xy}^0$  tabakalı kompozitin orta düzlemi için şekil değiştirmeleri gösterir.  $A_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 6$ ) ise

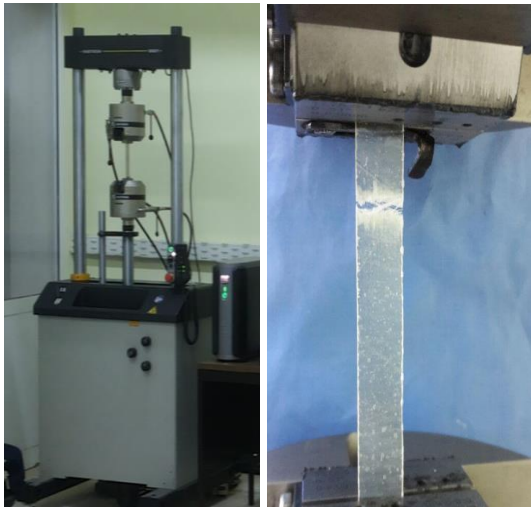
$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_{ij}]_k t_k \quad (2)$$

değerine eşittir. Burada  $t_k$ ,  $k$ 'ncı tabakanın kalınlığını temsil eder



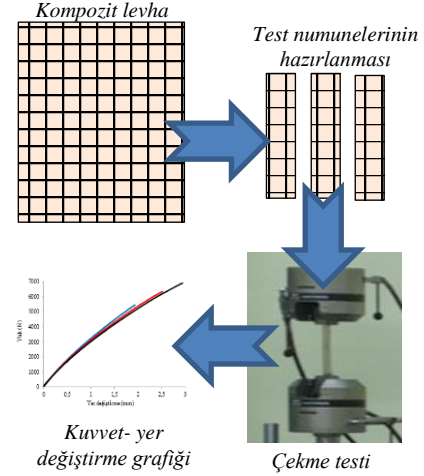
Şekil 1. Fiber takviyeli tabakalı kompozit levha.

Dönüştürülmüş indirgenmiş rijitlik matrisi olarak ifade edilen  $[\bar{Q}_{ij}]$ , fiber açısı  $\theta$ 'nın bir fonksiyonu olarak farklı tabakalar için elde edilebilir. Bu formülasyon gerilme yükü altında doğrusal malzeme davranışına sahip düz kompozit levhalar için kullanılır. Deneysel çalışmada, cam/epoksi kompozit levhalara çekme testleri uygulanmıştır. Deneyler Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekanik Laboratuvarı'nda 1 mm/dak çekme hızında Shimadzu universal test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).

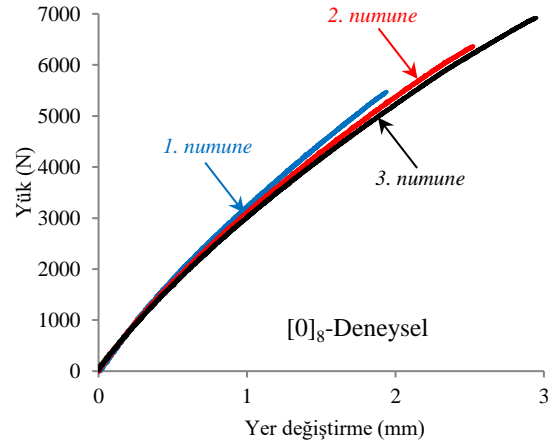


Şekil 2. Kompozit levhaların çekme testi ve hasarı.

Testler üçer kez tekrarlanmıştır. Yük ve yer değiştirme değerleri çekme test makinasından otomatik olarak elde edilmiştir.  $\theta = 0^\circ$  fiber açısı çekme yükü doğrultusunu göstermektedir. Tabakalı kompozit numunelerin boyutları; kalınlık  $t = 1.09$  mm, levha uzunluğu  $L = 80$  mm ve yükseklik  $h = 12.5$  mm'dir. Kompozit levhalar için yapılan deneysel çalışma aşamaları Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Kompozit levha için yapılan deneysel çalışmalar.



Şekil 4. Kompozit levhaların deneysel yük-yer değiştirme grafikleri.

$[0]_8$  kompozit için çekme testlerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme grafikleri sırasıyla Şekil 4 ve 5'te verilmiştir. Cam/epoksi kompozit levha için; fiber doğrultusu ve fibere dik doğrultudaki elastisite modülleri sırasıyla  $E_1=E_2= 25455$  MPa, kayma modülü  $G_{12}=2505$  MPa ve Poisson oranı  $\nu_{12}=0.155$ 'dir. Tasarımcılar sayısal çalışmalarında

Şekil 4’te verilen malzeme davranışını doğrusal olarak kabul ederlerse, analiz sonucu Şekil 5’teki gerilme-şekil değiştirme davranışında mor kesikli çizgi ile gösterilen doğruyu elde ederler ki bu (1) fiber doğrultusundaki  $E_1$  elastisite modülünün elde edildiği doğrudur.

Sayısal çalışmada, sonlu elemanlar paket programı ANSYS kullanılarak problemin doğrusal ve doğrusal olmayan çözümleri sağlanmıştır. Anizotropik malzemelerin lineer olmayan çözümü için *Hill* hasar teorisine dayanan model uygulanmıştır. *Hill* teorisi anizotropi eksenini ile kartezyen eksenlerin çalışması durumu için

$$\sigma_{ef} = \frac{1}{\sqrt{HA^2 + FB^2 + GC^2 + N\zeta^2 + MD^2 + LE^2}} \quad (3)$$

olarak yazılır. Burada  $\sigma_{ef}$  efektif gerilmedir. Katsayılar

$$G + H = \frac{1}{R_{xx}^2} \quad (4.a)$$

$$F + H = \frac{1}{R_{yy}^2} \quad (4.b)$$

$$F + G = \frac{1}{R_{yy}^2} \quad (4.c)$$

$$L = \frac{3}{R_{yz}^2}, \quad M = \frac{3}{R_{xz}^2}, \quad N = \frac{3}{R_{xy}^2} \quad (4.d)$$

$$\sigma_x - \sigma_y = A \quad (4.e)$$

$$\sigma_y - \sigma_z = B \quad (4.f)$$

$$\sigma_x - \sigma_z = C \quad (4.g)$$

$$\tau_{xy} = \zeta, \quad \tau_{yz} = D, \quad \tau_{xz} = E \quad (4.h)$$

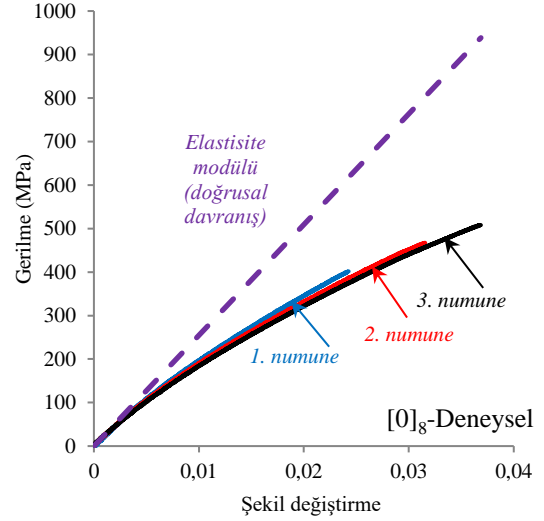
şeklinde olup, bu bağıntıların tanımı aşağıdaki gibidir.

$$R_{xx} = \frac{\sigma_{xx}^y}{\sigma_0}, \quad R_{yy} = \frac{\sigma_{yy}^y}{\sigma_0}, \quad R_{zz} = \frac{\sigma_{zz}^y}{\sigma_0} \quad (5.a)$$

$$R_{xy} = \frac{\sqrt{3}\sigma_{xy}^y}{\sigma_0}, \quad R_{yz} = \frac{\sqrt{3}\sigma_{yz}^y}{\sigma_0}, \quad R_{xz} = \frac{\sqrt{3}\sigma_{xz}^y}{\sigma_0} \quad (5.b)$$

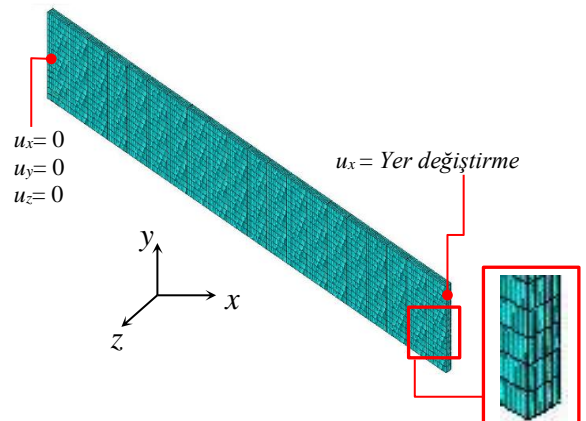
$\sigma_{xx}^y$ ,  $\sigma_{yy}^y$  ve  $\sigma_{zz}^y$  sırasıyla  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenlerindeki malzeme akma gerilmelerini  $\sigma_0$  ise referans akma

gerilmesini gösterir. *Hill* kriteri malzemenin akması boyunca korunan üç simetri düzlemine sahiptir. Bu nedenle de basit bir test için altı sabit gereklidir.  $R_{xx}$ ,  $R_{yy}$ ,  $R_{zz}$ ,  $R_{xy}$ ,  $R_{yz}$  ve  $R_{xz}$  sabitleri verilen doğrultudaki akma gerilmesinin referans (*von Mises*) akma gerilmesine oranıdır.



Şekil 5. Kompozit levhaların gerilme-şekil değiştirme grafikleri.

*Hill* sadece akma kriterini tanımladığından dolayı lineer malzeme mekanik özellikleri ve eksenel akma gerilmelerinin ayrıca programda girilmesi gerekir. *Solid186* eleman tipi sayısal modelde kullanılmıştır [19]. Sonlu eleman modeli toplam 1200 eleman ve 5115 düğümden meydana gelmiştir. Model için sınır şartları ve sonlu eleman modeli Şekil 6’da verilmiştir.



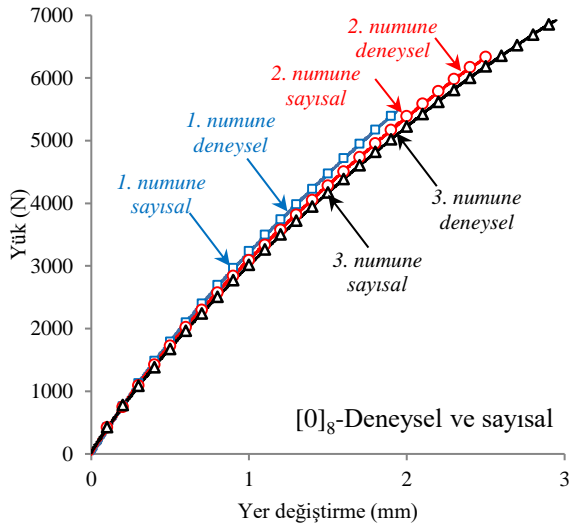
Şekil 6. Kompozit levhanın sonlu eleman modeli ve sınır şartları.

Fiber yönlenme açısını kompozit levhanın sonlu eleman modeline uygulayabilmek amacıyla

( $\theta \neq 0^\circ$ ), fiber doğrultusunda lokal koordinat sistemi tanımlanmış ve sonlu elemanlara bölme işlemi bu koordinat sistemine göre yapılmıştır. Bu nedenle de modelde her elemanın koordinat sistemi fiber oryantasyon açısına göre değiştirilmiştir.

### 3. Sonuçlar

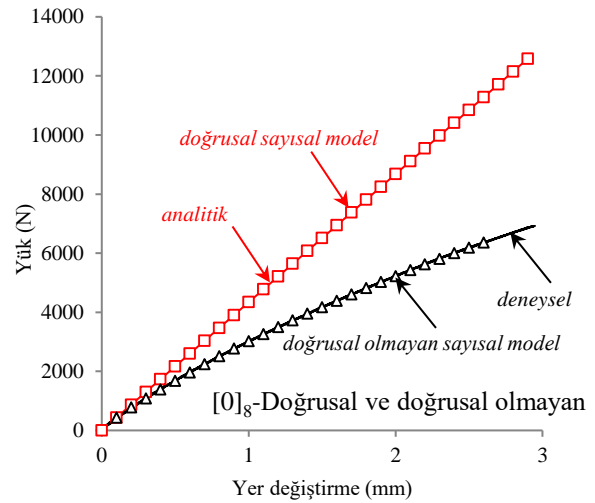
Çekme testleri sonrasında her numune için elde edilen doğrusal olmayan kuvvet-yer değiştirme grafikleri (Şekil 4) gerilme –şekil değiştirme grafiğine dönüştürülerek (Şekil 5) elde edilen grafikler sonlu elemanlar analizinde  $0^\circ$  için malzeme davranışı olarak programa girilmiştir. Analizler sonucunda deneysel sonuçlarla uyumlu sayısal çözüm sonuçları Şekil 7’de verilmiştir.



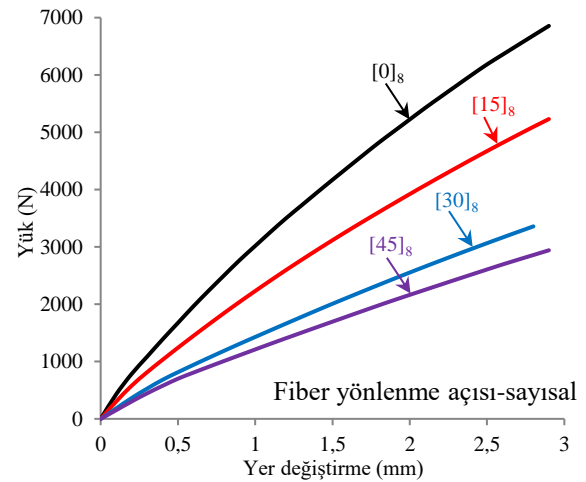
Şekil 7. Deneysel ve sayısal sonuçların doğrusal olmayan malzeme davranışı için karşılaştırılması.

Eğer analizlerde doğrusal olmayan malzeme davranışı yerine doğrusal malzeme davranışı kabul edilerek analizler gerçekleştirilecek olursa, büyük yer değiştirmeler için reaksiyon kuvvetleri arasında büyük farkların ortaya çıkmasına sebep olur (Şekil 8). Ayrıca veriler Denklem (1)’deki eşitlik kullanılarak elde edilen analitik sonuçlarla da karşılaştırılmıştır. Kompozit levhada fiber yönlenme açısının reaksiyon kuvvetleri üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla Şekil 9 ve 10 hazırlanmıştır. Cam/epoksi kompozit levha çapraz örgü dokuma fiberlerden üretildiği için maksimum yönlenme açısı  $\theta = 45^\circ$  olarak alınmıştır. Çünkü verilen yükleme şartları için  $45^\circ$ ’den sonraki açılarda malzeme,  $60^\circ$ ’de;  $30^\circ$ ’li

kompozite,  $75^\circ$ ’de;  $15^\circ$ ’li kompozite,  $90^\circ$ ’de ise  $0^\circ$ ’li kompozite benzeyecektir.  $\theta = 15^\circ, 30^\circ$  and  $45^\circ$ ’li kompozit levhaların yük-yer değiştirme grafikleri  $\theta = 0^\circ$ ’li kompozit levhalar ile benzer karakterdedir (Şekil 9). Çünkü  $\theta = 0^\circ$ ’li kompozit levhaların gerilme-şekil değiştirme grafikleri programa girildiği için ANSYS bu değerleri referans olarak almakta ve buna göre açı dönüşümlerini gerçekleştirmektedir.



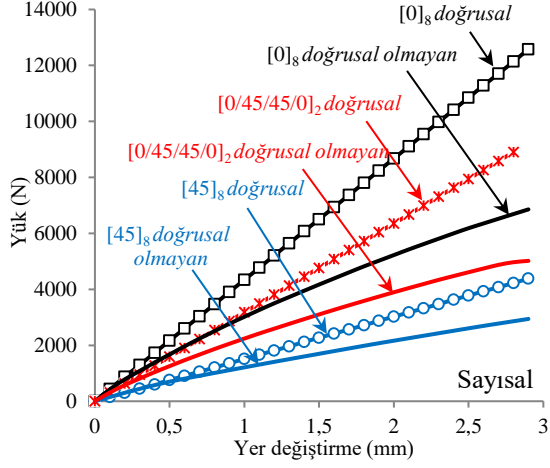
Şekil 8. Deneysel ve sayısal sonuçların doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışı için karşılaştırılması.



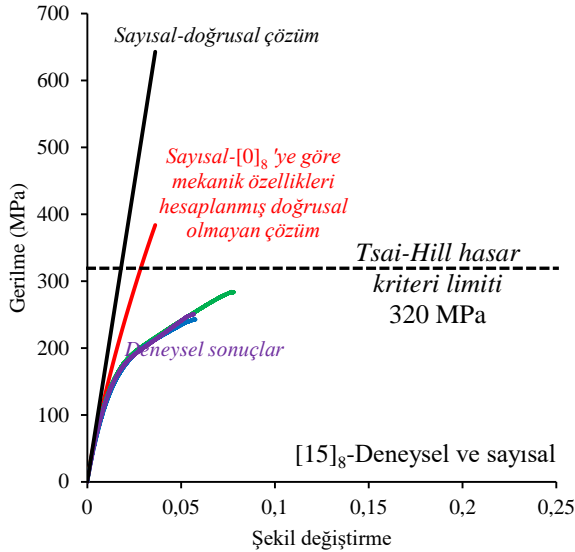
Şekil 9. Fiber yönlenme açısının sayısal kuvvet-yer değiştirme davranışına etkisi.

$\theta \neq 0^\circ$  için doğrusal ve doğrusal olmayan çözüm sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla sayısal çözüm sonuçları da gösterilmiştir (Şekil 10). Açının artması reaksiyon kuvvetini düşürmektedir. Doğrusal çözüm yerine

malzemenin gerçek mekanik özelliklerini kullanılması durumunda sonuçların özellikle küçük açı değerlerinde çok daha fazla farklılaştığı görülmektedir.



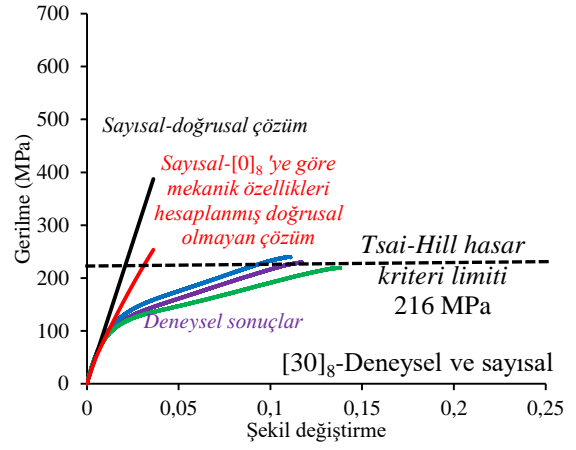
Şekil 10. Fiber yönelme açısının kuvvet-yer değiştirme davranışına etkisi.



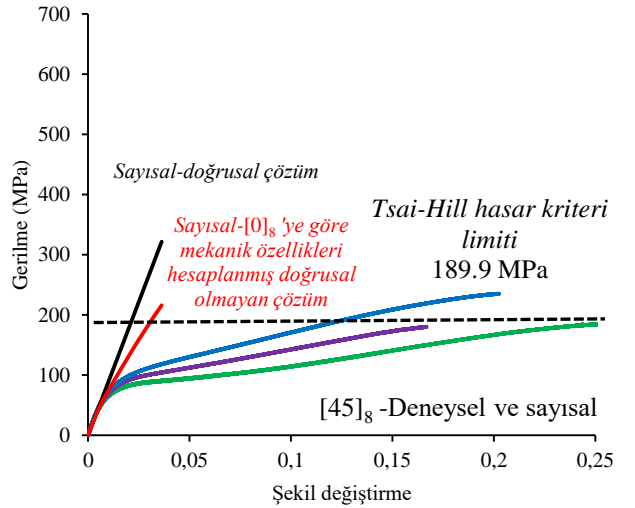
Şekil 11. [15°]<sub>8</sub> kompozit levhalar için deneysel ve sayısal gerilme-şekil değiştirme grafikleri.

Şekil 11-13 arasındaki grafiklerde sırasıyla  $\theta = 15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$ 'li kompozit levhaların deneysel gerilme-şekil değiştirme grafikleri verilmiştir. Ayrıca sonuçlar doğrusal elastik sayısal çözüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Açının artması ile birlikte fiberler yük doğrultusundan uzaklaşmakta ve kayma etkisi ile malzeme davranışında doğrusal olmayan etki önemli şekilde deneysel sonuçlarda ortaya çıkmaktadır. Eğer  $[0^\circ]_8$  tabaka dizilimli doğrusal

olmayan malzeme davranışı referans alınarak program tarafından yeni fiber açısı için çözümler yapılacak olursa bu sonuçların bile deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olmadığı görülebilir. Kompozit malzeme için çekme dayanımı  $X_T=Y_T=508$  MPa, basınç dayanımı  $X_C=Y_C=394$  MPa ve kayma dayanımı  $S=97$  MPa'dır. Açının artması hasar gerilmesini düşürürken, kopma uzamasını artırmıştır. Elde edilen hasar gerilmeleri Tsai-Hill hasar kriteri sonuçları ile de uyumludur.



Şekil 12. [30°]<sub>8</sub> kompozit levhalar için deneysel ve sayısal gerilme-şekil değiştirme grafikleri.



Şekil 13. [45°]<sub>8</sub> kompozit levhalar için deneysel ve sayısal gerilme-şekil değiştirme grafikleri.

$\theta \neq 0^\circ$  için deneysel ve doğrusal olmayan çözüm sonuçlarının elastik bölge sonrası uyumsuzluğu bu tip kompozitler için yeni bir malzeme modeli tanımlama gereğini ortaya koymayı gerektirmektedir. Eğer tasarımcılar için

elastik bölge sonrası malzeme tanımı önemli ise bu durumda bu tip kompozitlerin öncelikle yeni bir ortotropik malzeme olduğu kabulü ile mekanik özellikleri yeniden belirlenmelidir. Denklem (1)'in tersi alınacak olursa

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{*11} & A_{*12} & A_{*16} \\ A_{*21} & A_{*22} & A_{*26} \\ A_{*61} & A_{*62} & A_{*66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ifadesi elde edilir. Eğer tabakalı kompozitin düzlem mühendislik sabitlerinden  $x$ -doğrultusundaki elastisite modülü hesaplanmak istenirse Denklem (2)'de  $N_x = N_y = 0$  olarak yazılır. Bu durumda

$$E_x \equiv \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x^0} = \frac{N_x}{A_{*11}N_x} = \frac{1}{tA_{*11}} \quad (7)$$

olarak elde edilir. Benzer şekilde diğer mekanik özellikler  $E_y = 1/tA_{*22}$ ,  $G_{xy} = 1/tA_{*66}$  ve  $\nu_{xy} = -A_{*12}/A_{*11}$  şeklinde bulunur. Buna göre farklı açılar için elde edilen yeni mekanik özellikler Tablo 1'de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Farklı fiber yönlenme açılarına sahip kompozitler için düzlem mühendislik sabitleri.

Kompozit levha	$[0^\circ]_8$	$[15^\circ]_8$	$[30^\circ]_8$	$[45^\circ]_8$
$E_x$ (MPa)	25455	17075	10296	8590
$E_y$ (MPa)	25455	17075	10296	8590
$G_{xy}$ (MPa)	2505	3104	5957	11019
$\nu_{xy}$	0.155	0.433	0.658	0.715

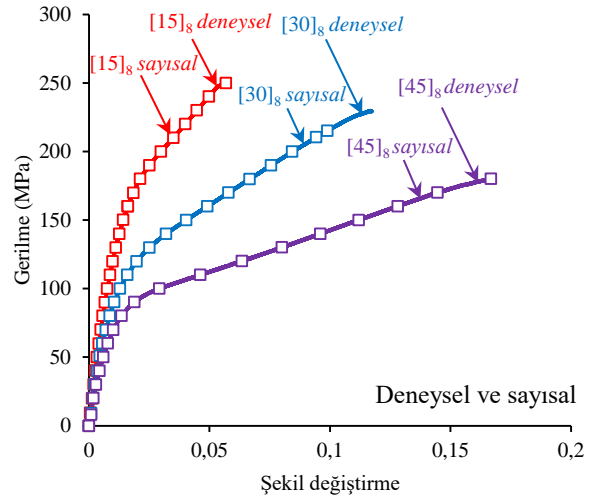
Tablo 1'den elde edilen mekanik özellikler kullanılarak kompozitlerin sayısal çözümünde gerilme-şekil değiştirme grafiğindeki doğrusal bölgenin tanımlanması sağlanmıştır. Doğrusal olmayan bölgenin tanımı için ise her bir açıdaki gerilme-şekil değiştirme davranışları programa veri olarak girilmiştir. Her deney numunesinden bir tanesi örnek olarak seçilmiştir. Bu durumda deneysel verilerle uyumlu sayısal sonuçlar Şekil 14'te sunulmuştur.

#### 4. Tartışma

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Kompozit malzemeler genellikle lineer elastik malzeme davranışı gösterirler. Ancak ince kesitli çapraz dokuma cam

fiber takviyeli vb. kompozit malzemelerin davranışı kısmen de olsa doğrusal olmayan davranış gösterebilmektedir. Bu tip malzemelerin davranışını doğrusal olarak kabul edip programda çözüm yaptırmanın elastik bölge sonrasında hatalara sebep olduğu görülmüştür.



**Şekil 14.**  $[\theta]_8$  kompozit levhalar için deneysel ve sayısal gerilme-şekil değiştirme grafikleri.

- $0^\circ$  takviye açısına sahip kompozitler için çekme testinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiği programa girilerek doğrusal olmayan bölgedeki hatalar giderilebilir.
- $0^\circ$  takviye açısı dışındaki kompozitler için sayısal çözüm yaptırıldığında doğrusal analiz sonuçlarının deneysel verilerle çok daha uyumsuz olduğu görülmüştür.
- $0^\circ$  takviye açısına sahip kompozitin mekanik özellikleri ve doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışı kullanılarak program üzerinden farklı fiber açıları için sonlu elemanlara bölme işlemi fiber açılarına göre yapılarak takviye doğrultuları tanımlanmış, ancak bu durumda bile sayısal sonuçlarla uyum sağlanamamıştır.
- Fiber takviye açısının  $0^\circ$ 'den farklı olduğu durumlar için öncelikle gerilme-şekil değiştirme grafiğindeki elastik bölge için kompozitin her bir fiber

açısında yeni düzlem mühendislik sabitleri hesaplanmıştır ve programa her bir açı sanki de yeni bir malzeme olarak tanımlanmıştır. Deneylerdeki doğrusal olmayan bölge ise programa veri olarak ayrıca girilmiş bu sayede deneysel ve sayısal verilerin uyumu sağlanmıştır.

- Tasarımcıların hassas analizler ve doğrusal olmayan malzeme davranışları için gerilme-şekil değiştirme davranışının doğru tanımlanması gereklidir. Fiber takviye açısının 0°'den farklı olduğu durumlar için deneysel gerilme-şekil değiştirme davranışının doğrusal olmayan bölgesi ayrıca belirlenmeli ve her bir açıdaki malzeme programa yeni bir malzemeymiş gibi girilmelidir.

## 5. Kaynakça

1. Flatscher, T., Wolfahrt, M., Pinter, G. and Pettermann H.E. (2012). Simulations and experiments of open hole tension tests – Assessment of intra-ply plasticity, damage, and localization, *Compos. Sci. Technol.*, **72**: 1090-1095.
2. Yuan, Z. and Lu, Z. (2014). Numerical analysis of elastic-plastic properties of polymer composite reinforced by wavy and random CNTs, *Comp. Mater. Sci.*, **95**: 610-619.
3. Turan, K., Solmaz, M.Y. ve Kaman, M.O. (2009). Tabakalı termoplastik askı zincirlerinde elasto plastik gerilme analizi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs (2009), M. Acarer, H.İ. Demirci, C. Göloğlu (Editörler), Karabük, 1569-1574.
4. Barbero, E.J., Lonetti P. and Sikkil, K.K. (2006). Finite element continuum damage modeling of plain weave reinforced composites, *Compos. Part B-Eng.*, **37**: 137-147.
5. Örcen, G., Gür, M. and Solmaz, M.Y. (2009). The plastic stress analysis at the laminated thermoplastic composite plates with elliptic hole, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **24**: 667-674.
6. Wu, L., Sket, F., Molina-Aldareguia, J.M., Makradi, A., Adam, L., Doghri, I. and Noels, L. (2015). Study of composite laminates failure using an anisotropic gradient-enhanced damage mean-field homogenization model, *Compos. Struct.*, **126**: 246-264.
7. Hoffarth, C., Rajan, S.D., Goldberg, R.K., Revilock, D., Carney, K.S., Bois, P.D. and Blankenhorn, G. (2016). Implementation and validation of a three-dimensional plasticity-based deformation model for orthotropic composites, *Compos. Part A-Appl. S.*, **91**: 336-350.
8. Ryou, H., Chung, K. and Yu, W.R. (2007). Constitutive modeling of woven composites considering asymmetric/anisotropic, rate dependent, and nonlinear behavior, *Compos. Part A-Appl. S.*, **38**: 2500-2510.
9. Goyal, D., Whitcomb, J.D. and Tang, X. (2008). Validation of full 3D and equivalent tape laminate modeling of plasticity induced non-linearity in 2x2 braided composites, *Compos. Part A-Appl. S.*, **39**: 747-760.
10. Xie, M. and Adams, D.F. (1995). A plasticity model for unidirectional composite materials and its applications in modeling composites testing, *Compos. Sci. Technol.*, **54**: 11-21.
11. Carvalho, N.V.D., Pinho, S.T. and Robinson, P. (2012). Numerical modelling of woven composites: biaxial loading, *Compos. Part A-Appl. S.*, **43**: 1326-1337.
12. Goldberg, R.K., Carney, K.S., Bois, P.D., Hoffarth, C., Harrington, J., Rajan, S.D. and Blankenhorn, G. (2014). Theoretical development of an orthotropic elasto-plastic generalized composite material model, *13<sup>th</sup> International LS-Dyna Users Conference, 8-10 June (2014)*, Dearborn, MI, 1-11.
13. Salami, S.J., Sadighi, M. and Shakeri, M. (2015). Improved high order analysis of sandwich beams by considering a bilinear elasto-plastic behavior of core: An analytical and experimental investigation, *Int. J. Mech. Sci.*, **93**: 270-289.
14. Huang, Z.M. (2002). On a general constitutive description for the inelastic and failure behavior of fibrous laminates-Part I: Lamina theory, *Comput. Struct.*, **80**: 1159-1176.
15. Batra, R.C., Gopinath, G. and Zheng, J.Q. (2012). Damage and failure in low energy impact of fiber-reinforced polymeric composite laminates, *Compos. Struct.*, **94**: 540-547.
16. He, W., Guan, Z., Li, X. and Liu, D. (2013). Prediction of permanent indentation due to impact on laminated composites based on an elasto-plastic model incorporating fiber failure, *Compos. Struct.*, **96**: 232-242.
17. Paccola, R. R., Neto, D. P. and Coda, H. B. (2015). Geometrical non-linear analysis of fiber reinforced elastic solids considering debonding, *Compos. Struct.*, **133**: 343-357.
18. Vyas, G.M., Pinho, S.T. and Robinson, P. (2011). Constitutive modelling of fiber-reinforced composites with unidirectional plies using a plasticity-based approach, *Compos. Sci. Technol.*, **71**: 1068-1074.
19. ANSYS, 13.0, Academic Teaching Introductory, Command References and Gui.

## AA Kıyıcı Beslemeli Bir Fazlı Asenkron Motor Hız Kontrolü

Zeynep Bala DURANAY, Hanifi GÜLDEMİR

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Elazığ  
zbduranay@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 01.02.2018; Kabul/Accepted:08.06.2018)

### Özet

Bu çalışmada darbe genişlik modülasyonlu Alternatif Akım (AA) kıyıcı beslemeli bir fazlı indüksiyon motorun Matlab/Simulink ortamında benzetimi yapılmıştır. AA kıyıcılar girişindeki sabit genlik ve frekanslı gerilimden değişken genlik ve frekansta gerilim elde edilebilen güç elektroniği devreleridir. Kıyıcı devresi içerisinde çeşitli sayılarda güç anahtarları bulunmakta ve bu anahtarların iletimde ve kesimde tutulma prensibine göre çalışmaktadır. Bu çalışmada iki anahtarlı AA kıyıcı devresi kullanılmıştır. AA kıyıcı devresinde kullanılan anahtarlama elemanlarına uygulanan işaretinin görev oranı değiştirilerek kıyıcı çıkışında elde edilen gerilimin etkin değeri değiştirilmiştir. AA kıyıcıya yük olarak bir fazlı bir asenkron motor bağlanmıştır. Kıyıcı anahtarlarının görev oranı değiştirilerek bir fazlı asenkron motora uygulanan gerilimin değeri değiştirilmiş ve bu gerilim değişimine bağlı olarak motor hızı ayarlanmıştır. Motor hız kontrolü kapalı çevrimli olarak yapılmış ve kontrolde PI denetleyici kullanılmıştır. Oluşturulan sistemin benzetimi yapılmış çeşitli referans hız değerleri için sonuçlar verilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Bir Fazlı Motor, AA Kıyıcı, Faz Kontrolü, Gerilim Kontrolü, Hız Kontrolü

## AC Chopper Fed Single Phase Induction Motor Speed Control

### Abstract

In this paper, Pulse Width Modulated (PWM) AC chopper fed single phase induction motor is simulated using Matlab/Simulink. AC choppers are the power electronic circuits which convert constant amplitude constant frequency input voltage to variable amplitude and frequency voltage. There are different numbers of power switches within the chopper circuits. It operates according to the switch on and switch off of these power switches. Two switch AC chopper is used in this study. By changing the duty ratio of the signal applied to the switching element in the AC chopper circuit, the effective value of the voltage obtained at the chopper output has been changed. A single-phase asynchronous motor is connected as the load to the AC chopper. By changing the duty ratio of the switches, the value of the voltage applied to the single phase asynchronous motor is changed and the motor speed is adjusted according to this voltage change. A closed loop speed control with PI controller is implemented. Simulations are done for various reference speed values and results are presented.

**Keywords:** Single-Phase Induction Motor, AC Chopper, Phase Control, Voltage Control, Speed Control

### 1. Giriş

Bir fazlı asenkron motorların hız ayarlı şekilde çalıştırılabilmesi için birçok yöntem bulunmaktadır. Basitliği, ucuzluğu sebebiyle en yaygın kullanılanı ise güç elektroniği elemanları kullanarak motora uygulanan gerilimin kontrol edilmesi yöntemidir [1-2]. Motora uygulanan gerilimin değiştirilmesi için bir oto transformatörü kullanılabilir [3] ancak, bu oto transformatörünün büyüklüğü, ağırlığı dikkate alındığında bu tip gerilim kontrol yöntemi pek de tercih edilmemektedir. Motora uygulanan gerilimin kontrolü için kullanılan diğer yöntem

motora uygulanan alternatif gerilimin ters paralel bağlı tristörler ya da triaklar gibi yarı iletken anahtarlar kullanılarak kısılması yöntemidir [4-6]. Faz açısı kontrolü yönteminde yüke giden güç, kaynak ve yük arasında bağlı olan triakın tetikleme açısının değiştirilmesi ile kontrol edilir.

Triak istenilen faz açısında ilettime geçirilerek kaynak geriliminin bir kısmının motora uygulanması sağlanır. Tristör ya da triyak kullanılarak yapılan faz kontrol yöntemi sürekli olmayan giriş akımı dalga şeklinin oluşmasına ve yüksek dereceden kaynak harmoniklerinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır [1, 7]. Bu harmonikler ilave kayıplara

sebepler olmakta, motor güç faktörünü ve verimini düşürmekte ve aynı zamanda motorun dinamik davranışını da olumsuz etkilemektedir [8].

Darbe Genişlik Modülasyonlu (DGM) alternatif akım kıyıcılarının kullanılması ile çıkış gerilimi ve akımı sinüs formuna daha yakın olmakta ve harmonik içerik azalmaktadır [9]. Tristörler yerine güç MOSFET' i ve IGBT gibi güç anahtarlama elemanlarının kullanılması ile oluşturulan AA kıyıcılar ile tristörlü devrelerin olumsuzlukları ortadan kaldırılabilir [10-12].

Bir fazlı indüksiyon motorun hızı, AA kıyıcının anahtarlama elemanlarının görev sürelerinin bağlı olarak kıyıcı çıkış geriliminin değiştirilmesi ile kontrol edilebilmektedir. Yüksek frekanslarda çalışan darbe genişlik modülasyonlu alternatif akım kıyıcılarla düşük frekanslı harmonikler bastırılmakta [132] oluşan yüksek frekanslı harmonikler ise kullanılacak küçük boyutlu filtrelerle elimine edilebilmektedirler. Bir fazlı asenkron motorlar için darbe genişlik modülasyonlu alternatif akım kıyıcı kontrolör kullanılarak bu kontrolörün performans karakteristiklerinin incelenmesi ve değerlendirilmesi [14]’de verilmiştir.

## 2. Alternatif Akım Kıyıcı

Genel olarak AA kıyıcıları sabit genlikli ve frekanslı alternatif gerilimi işleyerek çıkışında yine AA olarak veren güç elektroniği devreleridir.

Alternatif Akım kıyıcıları sabit frekanslı ve sabit genlikli şebeke geriliminden sabit veya değişken frekanslı ve genlikli bir gerilime ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılırlar. Bu devrelerle, sabit genlik ve frekanslı bir alternatif giriş gerilimi yüksek frekansta anahtarlanarak istenilen genlik ve frekanslı çıkış gerilimi elde edilmektedir. AA kıyıcılarla elde edilen gerilimler endüstriyel ısıtma, ışık kontrolü, motor yumuşak başlatma [15] ve motor gerilim kontrolü gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

AA kıyıcıların çoğu çıkış geriliminin genliğini kontrol etmek için kullanılan faz kontrollü devrelerdir. AA kıyıcılarında faz açısı kontrolü ve aç-kapa (on-off) kontrolü olmak üzere iki yöntem kullanılır. Faz açısı kontrolü yönteminde yüke giden güç, kaynak ve yük arasında bağlı olan tristör ya da triyakın tetikleme

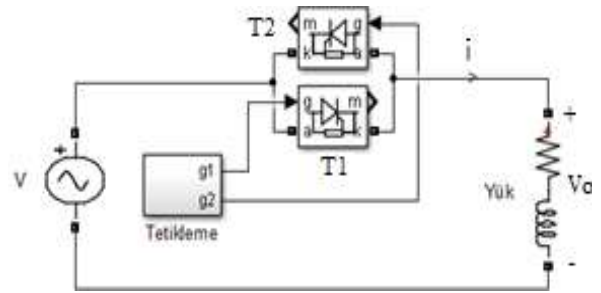
açısının değiştirilmesi ile kontrol edilir. İkinci yöntemde ise kıyıcıda kullanılan anahtarlar her bir yarım periyot içerisinde birkaç kez kapatılıp açılır. Oluşan bu darbelerin genişlikleri değiştirilerek çıkış gerilimi değiştirilir.

AA kıyıcılarda tristör, triak, IGBT gibi kontrollü anahtarlar kullanılarak sabit kaynak geriliminden ayarlanabilir AA gerilim elde edilmektedir. Bu çeviricilerin kalitesi, toplam harmonik bozulma ve giriş güç faktörü ile ölçülmektedir. Verimli bir çalışma için toplam harmonik bozulmanın mümkün olduğunca az olması, giriş güç faktörünün ise 1'e yakın olması gerekmektedir.

## 3. Faz Kontrollü AA Kıyıcı

Faz açısı kontrollü kıyıcı devresi, en basit hali Şekil 1’de görüldüğü gibi ters paralel bağlı iki tristörden oluşmaktadır. Yük ile kaynak arasında konan tristörlerin tetikleme açıları ayarlanarak kaynak geriliminin bir kısmının yüke uygulanması sağlanır ve böylece yük üzerindeki gerilimin etkin değeri değiştirilmektedir. Bu tip devre AA gerilim denetleyicisi olarak adlandırılmaktadır.

Omik yükte tristör üzerindeki gerilimin dalga şekli Şekil 2’de akım ve gerilim dalga şekilleri Şekil 3’de, endüktif yükteki çıkış dalga şekli ise Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 1. Tristör kontrollü AA kıyıcı

Omik yükte çıkış gerilimi ve dolayısıyla çıkış akımı yarım dalga simetrisine sahip olup, Doğru Akım (DA) bileşeni yoktur.

Kaynak gerilimi,

$$v_s = \sqrt{2}V \sin \omega t \quad (1)$$

olarak alınıp, tristörün  $\alpha$  açısında tetiklendiği varsayılırsa, çıkış geriliminin efektif değeri

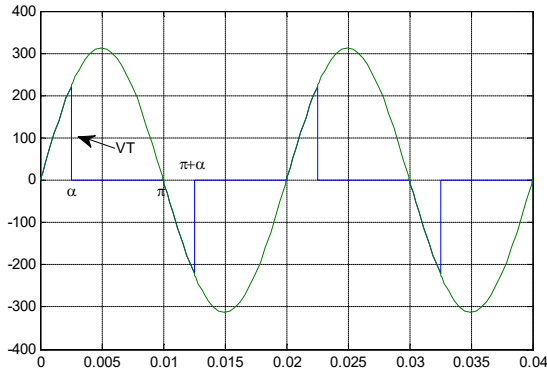


$$V_o = \left[ \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} 2v_s^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}}$$

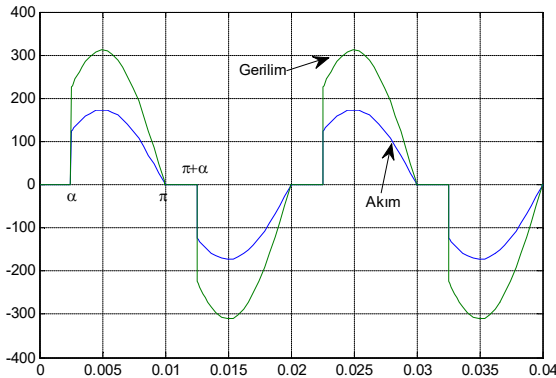
$$= v_s \left[ 1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]^{1/2} \quad (2)$$

olarak elde edilir.

Denklem 2 incelendiğinde, tetikleme açısı  $\alpha$ 'nın 0 ile  $\pi$  arasında değiştirilmesi ile çıkış geriliminin de 0 ile  $v_s$  arasında değiştirilebileceği görülmektedir.

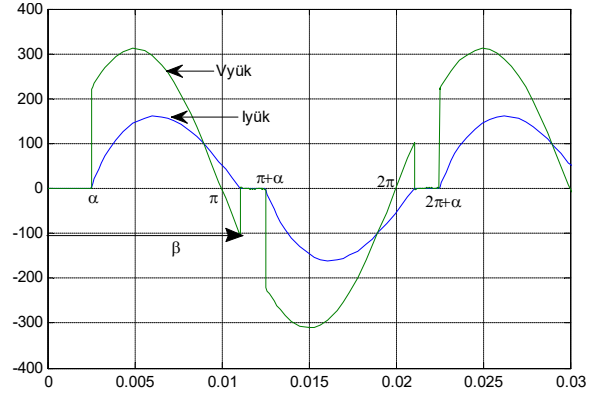


Şekil 2. Omik yükte kaynak ve T1 tristörü gerilimi



Şekil 3. Omik yükte çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri

Yükün endüktif olması durumunda 0 ile  $\pi$  arasında  $T_1$  tristörü doğru yönde polarlanmıştır.  $\omega t = \alpha$  da  $T_1$  tetiklendiğinde yük üzerinden akım akmaya başlar.  $\omega t = \pi$  olduğunda yük üzerindeki gerilim ve kaynak gerilimi sıfır olmasına rağmen yükün endüktif özelliğinden dolayı akım sıfır olmayarak akmaya devam eder ve  $\beta$  açısında sıfıra ulaşır.  $T_2$  tristörü  $\omega t = \pi + \alpha$  da tetiklenir ve yük üzerinden ters yönde akım akmaya başlar.



Şekil 4. Endüktif yükte çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri

Endüktif bir yük durumunda çıkış geriliminin etkin değeri,

$$V_o = \left[ \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} 2 V_s^2 \sin^2(\omega t) dt \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \frac{V_s}{\pi} \left[ \beta - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} - \frac{\sin(2\beta)}{2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

ile hesaplanabilmektedir.

Tristör tetikleme açısı  $\alpha$  ile gösterilmiş olup çıkış frekansı giriş frekansı ile aynı değerdedir. Tristör içinden geçen akımın değeri ise

$$i = \begin{cases} L \frac{di}{dt} + Ri = \sqrt{2} V_s \sin \omega t & \alpha \leq \omega t \leq \beta \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilmekte olup yük açısının tetikleme açısından büyük ve küçük olma durumlarına bağlı olarak bu diferansiyel denklem çözülerek akım bulunabilmektedir [16].

Bu şekildeki faz kontrol yöntemi sürekli olmayan giriş akımı dalga şeklinin oluşmasına ve düşük dereceden kaynak harmoniklerinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Anahtarlama anlarının yükün faz açısına bağımlı olması da yükün değişken olduğu durumlarda kontrolde güçlükler sebep olmaktadır. Harmonik içeriğinin yüksek olması ve tetikleme açısının hassas denetimini sağlayamaması bu devrenin olumsuz yönlerini oluşturmaktadır.

Bir AA kıyıcı devresi çift yönlü akım geçirebilen anahtarlar gerektirmektedir. Akımın yön değiştirmesi yani komütasyon olayı gerilim yükselmelerine sebep olabilmektedir.

Komütasyon olayı oldukça önemli olup, her iki anahtarın da kapalı olduğu anda alternatif bir akım yolu oluşturulmalıdır. Faz kontrollü devrelerde oluşan bu problemler, kıyıcı devresinde serbest dolaşım yolu eklenmesi ile iyileştirilebilmektedir.

Daha hassas kontrol imkanı sunması, çıkış gerilimi ve akımının sinüs formuna mümkün olduğunca yakın olması yani harmonik içeriğinin az olması darbe genişlik modülasyonlu alternatif akım kıyıcılarının kullanılması ile mümkün olmaktadır.

#### 4. Darbe Genişlik Modülasyonlu Kontrol

Darbe genişlik modülasyonlu AA kıyıcıların performanslarını artırmak için kullanılan bir yöntemdir. Darbe genişlik modülasyonu, üretilecek olan darbelerin, genişliklerini kontrol ederek, çıkışta üretilmek istenen analog elektriksel değerin veya sinyalin elde edilmesi tekniğidir.

Darbe genişlik modülasyon tekniği, Şekil 5' de verilen en basit haliyle bir testere dişi sinyal ile bir referans gerilimin karşılaştırılması ile kontrol sinyali elde edilmektedir. Çıkış geriliminin kontrolü, referans gerilimin değiştirilmesi ile sağlanmaktadır. Genellikle sabit tutulan testere dişi sinyalin frekansı, anahtarlama veya kıyım frekansı olarak anılmaktadır.

Her bir yarım periyoddaki darbe genişliğinin ya da darbe sayısının artırılması, düşük dereceli harmoniklerin elimine edilmesi dolayısıyla güç faktörünün iyileştirilmesini sağlamaktadır.

Karşılaştırma işlemi sonunda çıkış gerilimi denklemi;

$$V_o = \begin{cases} V & V_{dc} > V_T \\ 0 & V_{dc} < V_T \end{cases} \quad (5)$$

olarak elde edilir.

Üretilen kare dalga darbe sinyallerinin genişliklerinin ortalaması, çıkışta üretilecek olan analog değerin elde edilmesini sağlar.

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} f(t) dt = V \frac{t_1}{T} \quad (6)$$

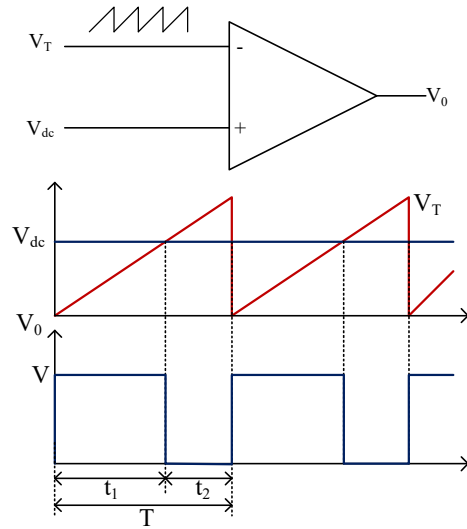
$$D = \frac{t_1}{T} \quad (7)$$

görev oranı olarak tanımlandığında, çıkış gerilimi,

$$V_o = V D \quad (8)$$

görev oranına bağlı olarak elde edilir.

Gerilimin kontrolü için çeşitli darbe genişlik modülasyon teknikleri kullanılmakta olup, bu teknikler içerisinde sinüzoidal darbe genişlik modülasyon tekniği en yaygın olup aynı zamanda harmoniklerin bastırılması için de kullanılmaktadır.



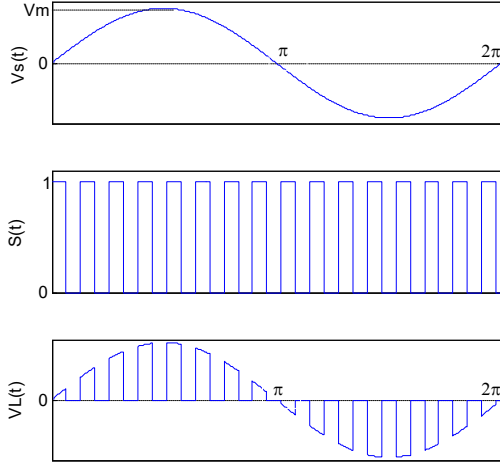
Şekil 5. Darbe genişlik modülasyon tekniğinin elde edilişi

#### 5. Darbe Genişlik Modülasyonlu AA Kıyıcı

En basit şekliyle, darbe genişlik modülasyonlu kontrol tekniği Şekil 6' da görüldüğü gibi kaynak gerilimini yüksek frekansla kıyım temeline dayanmaktadır. Gerilim iki yönlü anahtarlarla kıyılarak anahtarlama elemanının görev oranı değiştirilerek yük akımı ve geriliminin etkin değeri değiştirilmektedir. Görev oranı ile yük akım ve gerilimi doğru orantılı olup, görev oranının artırılıp azaltılması yük üzerindeki gerilim ve yükten akan akımın artırılıp azaltılmasına sebep olmaktadır. Literatürde birçok darbe genişlik modülasyon tekniği bulunmaktadır [17-19]. Bu tekniklerin temel amacı çıkış geriliminin kontrolü yanında

harmoniklerin bastırılması ve güç faktörünün iyileştirilmesidir.

Kıyılmış gerilim, kaynak geriliminin Şekil 6' da görüldüğü gibi D görev oranlı ve  $\omega_s$  anahtarlama frekanslı bir anahtarlama sinyali  $s(t)$  ile çarpılmasıyla elde edilebilmektedir.



Şekil 6. Sinüzoidal işaretin darbe genişlik modülasyonlu kıyılması

Anahtarlama fonksiyonu  $s(t)$ ' nin Fourier açılımı,

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_s t + b_n \sin n\omega_s t) \quad (9)$$

Burada  $a_0$ , ortalama değeri,  $a_n$  ve  $b_n$  ise Fourier katsayılarını,  $n$  harmonik derecesini ve  $\omega_s$  ise anahtarlama frekansını belirtmektedir.

$a_0$ ,  $a_n$  ve  $b_n$  katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$a_0 = \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{t_1}{T} = D \quad (10)$$

$$a_n = \frac{1}{n\pi} \sin(n2\pi D) \quad (11)$$

$$b_n = -\frac{1}{n\pi} [1 + \cos(n2\pi D)] \quad (12)$$

Kaynak gerilimi,

$$v_s(t) = V_m \sin \omega t \quad (13)$$

olup, burada  $\omega$  açılal frekans ve  $V_m$  ise kaynak gerilimi tepe değeridir.

Yük gerilimi kaynak gerilimi ile anahtarlama fonksiyonunun çarpımından elde edilmektedir.

$$v_L(t) = v_s(t) \cdot s(t) = V_m \sin \omega t \cdot s(t) \quad (14)$$

$$v_L(t) = a_0 V_m \sin \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n V_m (\cos n\omega_s t \cdot \sin \omega t) + b_n V_m (\sin n\omega_s t + b_n \sin \omega t)] \quad (15)$$

Bu ifadede yüksek frekanslı terimler filtre edildiğinde yük gerilimi kaynak frekansının temel bileşeni cinsinden ifade edilebilmektedir. Bu durumda,

$$v_L(t) = a_0 V_m \sin \omega t = D \cdot V_m \sin \omega t \quad (16)$$

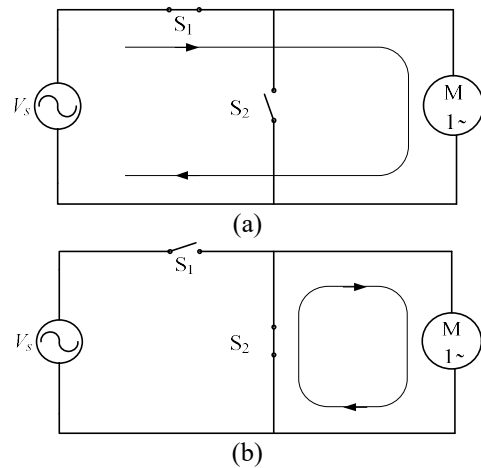
Yük geriliminin etkin değeri ise,

$$v_{Leff} = \frac{D \cdot V_m}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

olmaktadır.

## 6. DGM Kontrollü AA Kıyıcı Beslemeli Bir Fazlı Motor Devresi

Şekil 7' de verilen darbe genişlik modülasyonlu kıyıcı devresi en basit şekliyle iki tane iki yönlü anahtardan oluşmaktadır.

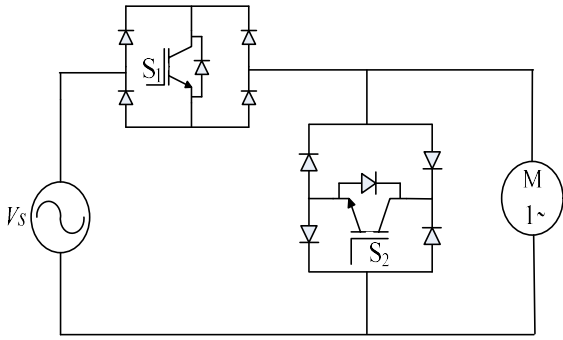


Şekil 7. Basit bir AA kıyıcı devresi ve akım yolları a)S<sub>1</sub> anahtarı kapalı b)S<sub>2</sub> anahtarı kapalı

Anahtarlardan bir tanesi yüke seri bağlı diğeri ise paralel bağlı durumdadır. Seri bağlı S<sub>1</sub>

anahtarları periyodik olarak yükü kaynağa bağlayıp kaynaktan ayırmakta ve bu şekilde gerilimi kıyarak yük üzerindeki gerilimi ayarlamaktadır. Yani  $S_1$  anahtar gerilimi kıyma için,  $S_2$  ise  $S_1$  açıldığında yük üzerinde birikmiş bulunan enerjinin deşarjı için yük akımının transferi, serbest dolaşım yolu için kullanılmaktadır.

Bir fazlı AA gerilim denetleyicisi, bir anahtar ve dört diyot kullanılarak Şekil 8’deki gibi düzenlenebilir. Dört diyot, köprü tipi doğrultucu gibi çalışmaktadır.



Şekil 8. İki anahtarlı AA kıyıcı devresi

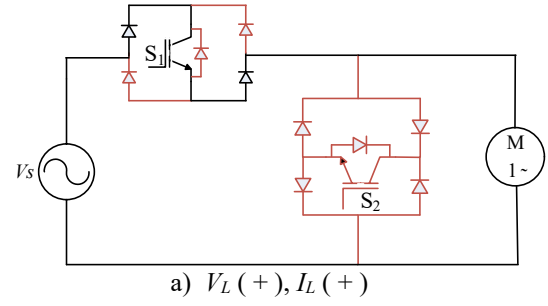
Devredeki köprü diyot ile anahtar yapısı iki yönlü anahtar gibi çalışmaktadır. Diyotlar anahtarlara ters gerilim uygulanmasını engellemektedir.

Pozitif yarım periyod süresince,  $S_1$  anahtarı kapalı iken, yük akımı kaynaktan  $S_1$  anahtarı üzerinden yüke doğru akar. Şekil 9-a bu modu göstermektedir. Bu mod süresince, güç bir fazlı indüksiyon motora aktarıldığından aktif mod olarak adlandırılmaktadır.

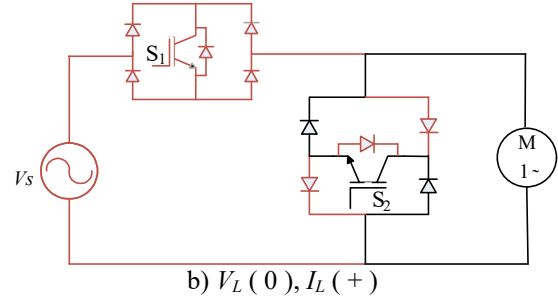
Pozitif yarım periyod süresince  $S_1$  anahtarı açık olduğunda serbest dolaşım başlar. Yükte (sargıda) biriken enerji serbest dolaşır ve  $S_2$  anahtarı üzerinden kendiliğinden söner. Şekil 9-b bu modu göstermektedir.

Negatif yarım periyod süresince,  $S_1$  anahtarı kapalı iken yük akımı Şekil 9-c’de görüldüğü gibi kaynaktan,  $S_1$  anahtarı üzerinden yüke doğru akar.

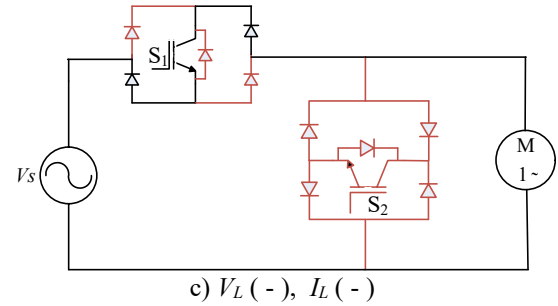
Negatif yarım periyod süresince  $S_1$  anahtarı açık olduğunda serbest dolaşım başlar. Yükte (sargıda) biriken enerji serbest dolaşır ve Şekil 9-d’de görüldüğü gibi  $S_2$  anahtarı üzerinden yük üzerinde harcanır.



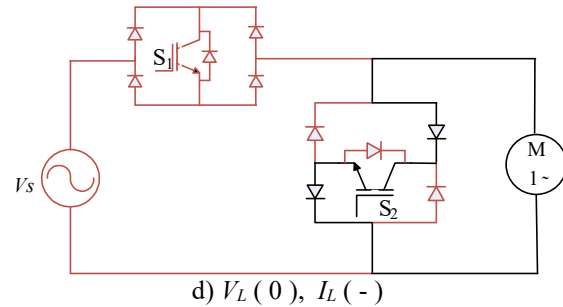
a)  $V_L (+), I_L (+)$



b)  $V_L (0), I_L (+)$



c)  $V_L (-), I_L (-)$



d)  $V_L (0), I_L (-)$

Şekil 9. AA kıyıcı çalışma modları

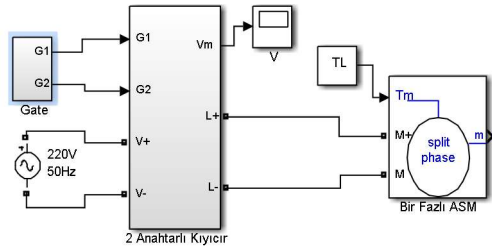
## 7. Benzetim Çalışması

Darbe genişlik modülasyonlu iki anahtarlı alternatif akım kıyıcı beslemeli indüksiyon motor Matlab/Simulink modeli Şekil 10’da verilmiştir. Yük olarak bir fazlı indüksiyon motor kullanılmıştır. Burada kullanılan motor 220V, 4 kutuplu, 1 HP, kondansatör başlatmalı ve çalıştırılmalı bir fazlı motordur.

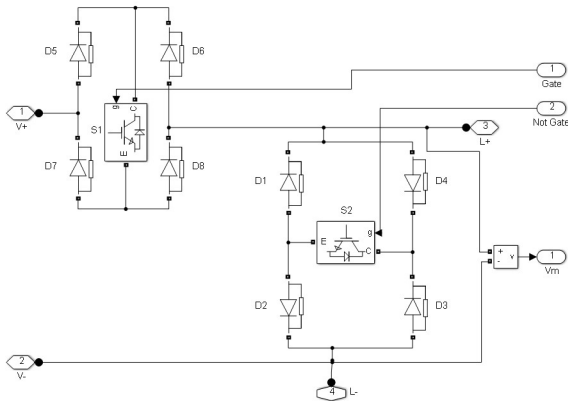
AA kıyıcı Matlab/Simulink modeli Şekil 11’de verilmiştir. Anahtarlara uygulanan işaretlerin

görev oranı değiştirilerek motora uygulanan gerilimin efektif değeri değiştirilmiş ve buna bağlı olarak da motor hızı incelenmiştir.

Devredeki anahtarların anahtarlama düzeni kaynak geriliminin polaritesi ve yük akımı dikkate alınarak belirlenmektedir. Akımın yönüne bağlı olmadan her durumda yük akımının sürekliliği sağlanacak şekilde bir anahtarlama düzeni kullanılmalıdır. Böyle bir anahtarlama düzeni Tablo 1’ de verilmiştir.



Şekil 10. AA kıyıcı bir fazlı indüksiyon motor Simulink modeli



Şekil 11. AA kıyıcı Simulink modeli

Tablo 1. Anahtarlama düzeni

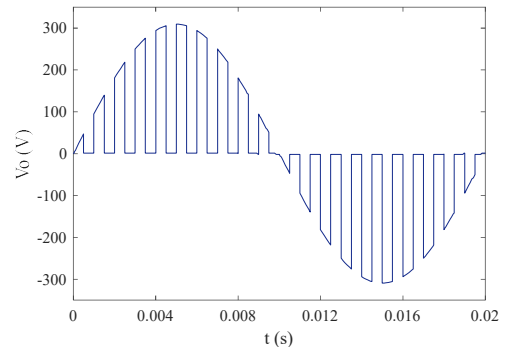
	S1	S2
$V_s > 0, I_L > 0$	1	0
$V_s < 0, I_L > 0$	0	1
$V_s < 0, I_L < 0$	1	0
$V_s > 0, I_L < 0$	0	1

Kaynak gerilimi ile yük akımı aynı polariteli olduğunda S1 kapalı S2 ise açık durumdadır. Kaynak gerilimi ile yük akımı farklı polaritelerde olduğunda S2 anahtarı kapalı S1 anahtarı açık durumdadır. Bu durumda yük akımının yönüne bağlı olmaksızın yük akımının sürekliliği sağlanmış olmaktadır.

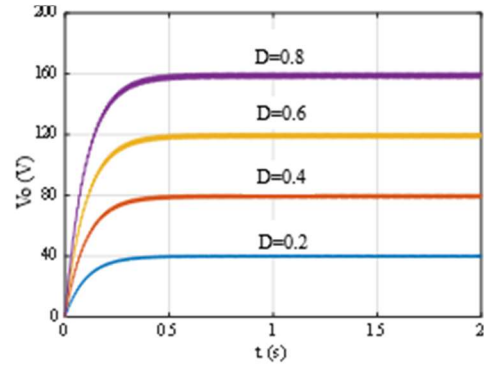
AA kıyıcı kullanarak elde edilen bir çıkış gerilimi örneği Şekil 12’ de verilmiştir. Burada

kıyılmış çıkış geriliminin rahat görülebilmesi için anahtarlama frekansı küçük tutulmuştur.

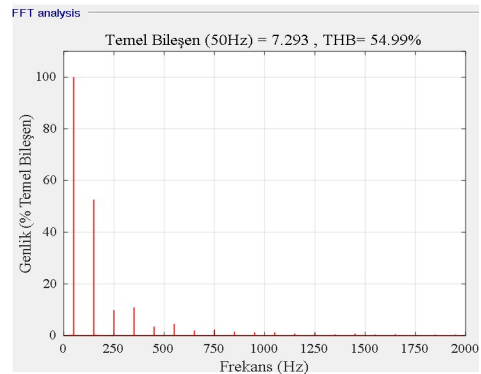
Anahtarlara uygulanan işaretin görev oranına bağlı olarak çıkış gerilimi efektif değeri de değişmektedir. Farklı görev oranlarında elde edilen çıkış gerilimi etkin değeri Şekil 13’de verilmiştir. Ters paralel bağlı tristörlü faz açılı kontrollü AA kıyıcı devresi ile iki anahtarlı AA kıyıcı devresi ile aynı yük beslenmiş ve elde edilen harmonik içerikler karşılaştırılmıştır. Her iki devreye ilişkin akım frekans spektrumu Şekil 14’ de verilmiştir.



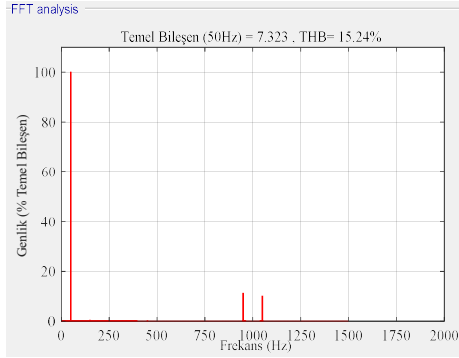
Şekil 12. Kıyılmış kaynak gerilimi (yük gerilimi)



Şekil 13. Farklı görev oranlarında çıkış gerilimi etkin değeri



(a)

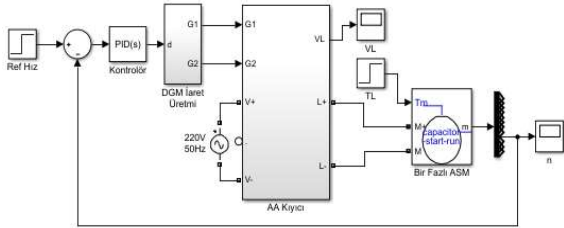


(b)

Şekil 14. Akım frekans spektrumu a) Ters paralel bağlı tristör b) İki anahtarlı kıyıcı

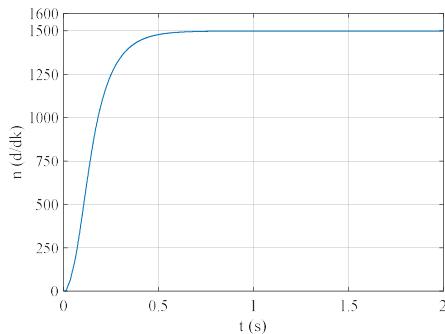
Harmonik spektrumdan da görüleceği üzere tristör kullanan kıyıcıda toplam harmonik bozulma %54.99 iken iki anahtarlı kıyıcı devresinde oluşan toplam harmonik bozulma ise %15.24 olmuştur.

Motor hızının kapalı çevrimli olarak kontrol edilebilmesi için oluşturulan Simulink programı Şekil 15’de verilmiştir.

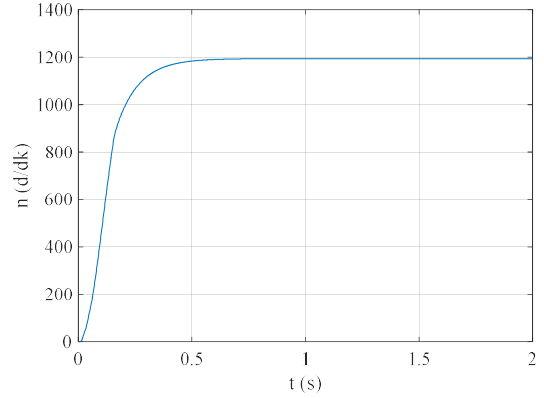


Şekil 15. Kapalı çevrimli hız kontrol sistemi

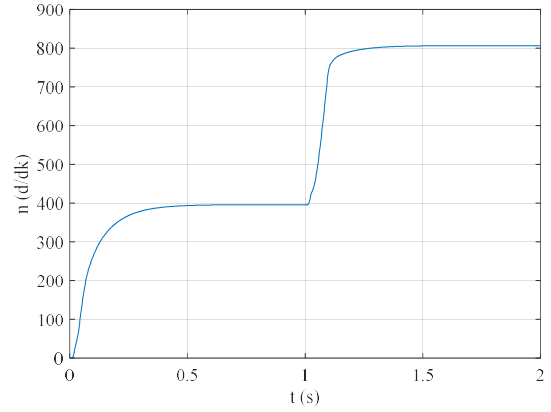
Kapalı çevrimli sistem değişik referans hızlarda çalıştırılarak benzetim sonuçları elde edilmiştir. Şekil 16’ de referans hız değeri motorun nominal hızı olan 1500 d/dk olarak alınmış, Şekil 17’da ise motor referans hız değeri 1200 d/dk olarak verilmiştir.



Şekil 16. 1500 d/dk’ lık referans hızda motor hız cevabı

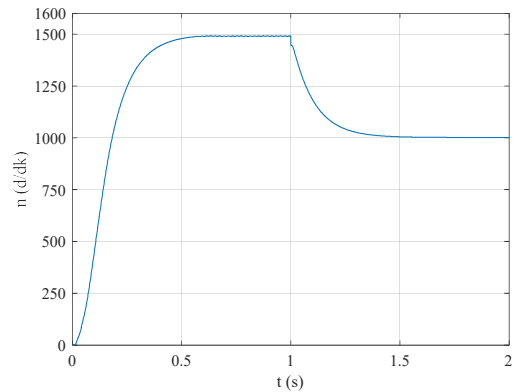


Şekil 17. 1200 d/dk’ lık referans hızda motor hız cevabı



Şekil 18. Referans hız değiştiğinde motor hız değişim cevabı

Motor 400 d/dk lık hızda dönerken  $t=1s$ ’ de motor referans hızı 800 d/dk’ ya çıkarılmış ve elde edilen motor hızı Şekil 18’ de verilmiştir. Motor Nominal hızda 1500 d/dk ile dönerken referans hız değeri 1000 d/dk’ya düşürülmüş ve alınan cevap Şekil 19’ da verilmiştir.



Şekil 19. Adım hız değişikliğinde motor hız değişim cevabı

## 8. SONUÇ

Bir fazlı indüksiyon motora uygulanan gerilimin efektif değeri, darbe genişlik modülasyonlu AA kıyıcı devresinde kullanılan anahtarlama elemanlarına uygulanan anahtarlama işaretlerinin darbe genişlikleri değiştirilerek ayarlanabilmektedir. Kullanılan AA kıyıcı devresi iki tane iki yönlü güç anahtarı içermektedir. Bu yapının avantajı diğer AA kıyıcı yapıları ile karşılaştırıldığında az sayıda anahtarlama elemanı kullanıldığından daha kolay bir şekilde kontrol edilebilmesidir.

Bu çalışmada AA kıyıcı anahtarlama elemanına uygulanan işaretin görev oranı değiştirilerek motora uygulanan gerilimin etkin değeri değiştirilmiş ve buna bağlı olarak motorun hızının değiştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla oluşturulan Simulink benzetim programı ile kapalı çevrimli olarak bir fazlı asenkron motor değişik referans hız değerlerinde çalıştırılmış ve alınan sonuçlar verilmiştir. Alınan sonuçlardan AA kıyıcı anahtarlama işareti görev oranı değiştirilerek motorun hızının da değiştirildiği gösterilmiştir.

## 9. Kaynaklar

1. Paice, D.A. (1968). Induction motor speed control by stator voltage control. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, **2**: 585-590.
2. Saracoglu, B., Kale, M., Ozdemir, E. (2004). A novel technique for optimal efficiency control of induction motor fed by PWM IGBT AC chopper. *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conf. (PESC 04)*, **5**: 3353-3358.
3. Bruce, F.M., Graefe, R.J., Lutz, A., Panlener, M.D. (1984). Reduced-voltage starting of squirrel-cage induction motors. *IEEE Trans. on Industry Applications*, **IA-20 (1)**: 46-55.
4. Sastry, V.V., Prasad, M.R., Sivakumar, T.V. (1997). Optimal soft starting of voltage-controller-fed IM drive based on voltage across thyristor. *IEEE Trans. on Power Electronics*, **12 (6)**: 1041-1051.
5. Yildirim, D., Bilgic, M. (2008). PWM AC chopper control single-phase induction motor for variable speed fan application. *Annual Conf. of IEEE Ind. Electronics*, **1 (1)**: 1337-1342.
6. Sriram, C., David, V., and Rao, J. (2015). Simulation design, control and analysis of induction motor based AC chopper. *International Electrical Engineering Journal (IEEJ)*, **6 (2)**:1771-1779.
7. Longya, X. (1992). Dynamic model of an integral-cycle controlled single-phase induction machine. *IEEE Trans. Energy Convers.*, **7 (4)**: 761-767.
8. Mazuccheli, M., Puglisi, L., Sciutto, G., Tenti, P. (1982). Improving the performance of AC:AC static converters with high frequency AC chopper control. *Proceedings of Powercon'9 Conference*, **1 (3)**: 1-9.
9. Hongxiang, Y., Min, L., Yancho, J. (2004). An advanced harmonic elimination PWM technique for AC choppers. *35th Annual IEEE Power Electronics Specialist's Conf.*, 161-165.
10. Ahmed, N.A., Amei, K., Sakui, M. (1999). A new configuration of single-phase symmetrical PWM AC chopper voltage controller. *IEEE Trans. on Indus. Electronics*, **46 (5)**: 942 – 952.
11. Hunyar, ., Veszpremi, K. (2001). Pulse width modulate IGBT AC chopper. *Proceedings of Periodical Polytechnica Ser. Electrical Eng.* **45 (3-4)**: 159 – 178.
12. Kmar, P. S., Mahendar, B., and Sruthi, M. (2014). Design and implementation of AC chopper. *Int. J. Emerg. Eng. Res. Technol*, **2(1)**: 36-41.
13. Choe, G.H., Wallace, A.K., Park, M.H. (1989). An improved PWM technique for AC choppers. *IEEE Trans. Power Electronics*, **4**: 496 – 505.
14. Nabil A. Ahmed, Kenji Amei, Masaaki Sakui, (2000). AC chopper voltage controller-fed single-phase induction motor employing symmetrical PWM control technique. *Electric Power Systems Research*, **55**: 15-25.
15. Thanyaphirak, V., Kinnares, V., Kunakorn, A. (2013). Soft starting control of single-phase induction motor using PWM AC chopper control technique. *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 26-29.
16. Hart, D.W., (2011). *Power Electronics*, Mc Graw Hill.
17. Zigirkas, G., Kalomiros, J. (2016). Voltage control of single-phase induction motors using asymmetrical PWM and fuzzy logic. *5th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST)*, 1-4.
18. Rao, S.S., Shailaja, N. (2005). Improving voltage regulation and harmonic elimination using genetic algorithm in PWM choppers. *IEEE Conference on International Telecommunication Energy (INTELEC'05)*, 449-454.
19. Bilgin, M.Z., Kılıcarıslan, U. (2010). Voltage harmonic elimination of PWM AC chopper using artificial neural network. *ELECO'2010*, 173-178.





## Reflüks Yöntemle Sentezlenmiş Mangan Oksit İle Sabit Yataklı Kolon Reaktörde Parasetamol Giderimi

Özlem Tepe\*

\*Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Bölümü, 23119, Elazığ  
\*e-mail:otepe@firat.edu.tr

(Geliş/Received:09.02.2018; Kabul/Accepted: 29.08.2018)

### Özet

Bu çalışmada, reflüks yöntemle hazırlanan mangan oksit ile parasetamol giderimi sabit yataklı kolon reaktörde incelenmiştir. Parasetamol giderimi üzerine besleme akış hızı, başlangıç parasetamol konsantrasyonu ve adsorbent dozajı gibi parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. 4.8 mL/dk akış hızı, 100 mg/L parasetamol konsantrasyonu ve 1 g adsorbent dozajı kullanıldığında toplam adsorplanmış parasetamol miktarı 68.0 mg olarak tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Farmasotik bileşikler, parasetamol, sabit yataklı kolon reaktör, mangan oksit.

## Paracetamol Removal in Fixed Bed Column Reactor with Manganese Oxide Synthesized by Reflux Method

### Abstract

In this study; the removal of paracetamol by manganese oxide prepared by reflux method was investigated in a fixed-bed column reactor. The effect of parameters such as feed flow rate, initial paracetamol concentration and adsorbent dosage on paracetamol removal was investigated. When a flow rate of 4.8 mL/min, paracetamol concentration of 100 mg/L and adsorbent dosage of 1 g were used, the total amount of adsorbed paracetamol was detected as 68.0 mg.

**Key words:** Pharmaceutical compounds, paracetamol, fixed bed column reactor, manganese oxide.

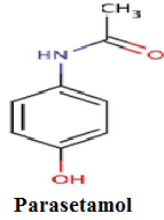
### 1. Giriş

Farmasotik aktif bileşikler, yüzeysel sular, yeraltı suları ve toprak gibi farklı çevresel ortamlarda giderek artan bir sıklıkta belirlenmektedir. Doğal kaynakların bu tür bileşiklerle kirlenmesi, çevresel araştırmaları ön plana çıkarmıştır. Binlerce ton farmasotik aktif bileşikler, metabolize olmamış bir şekilde ya da aktif metabolitler olarak atılırlar ve her yıl kanalizasyon sistemine boşaltılır. Bu bileşikler sonra sürekli olarak yüzeysel sulara ve hatta içme suyuna dahi ulaşabilir. Parasetamol (acetaminophen ya da N-acetyl-p-aminophenol), Amerika Birleşik Devletlerinde en yaygın olarak kullanılan reçetesiz ve reçeteli ağrı kesici ilaçtır (Şekil 1). Örneğin 2001-2005 yılları arasında 24-29 milyon dozaj parasetamol satılmıştır. Parasetamol ABD Jeoloji Kurumu tarafından 1999-2000 yılında yapılan bir çalışmada 139 akarsuda en sık olarak belirlenmiş antropojenik

bileşiklerden biridir. Son bir çalışmada, Kaliforniya'da içme suyu temini için kullanılan yeraltı suyunda 1.89 µg/L kadar seviyelerde parasetamol belirlenmiştir. Diğer yandan, insanda parasetamol metabolizma konusunda yapılan çalışmalarda, parasetamol ilacının tetiklediği hepatoksisitenin ABD'de akut karaciğer yetmezliğinin (ALF) en önemli bir sebebi olduğu ve parasetamolün reaktif metabolitlerinin ilacın tetiklediği toksisitenin gelişimine katkı sağlayabileceği ileri sürülmüştür. Parasetamol için tahmin edilen çevresel konsantrasyonlarından türetilmiş risk katsayıları 1.8 ve 7.1'dir. Bu katsayılar, potansiyel çevresel endişe oluşturduğunu ve ileri araştırmalar yapılmasının gerekli olduğunu ortaya koymaktadır [1].

Diğer popüler farmasotikler gibi parasetamol ve onun metabolitleri dışkı yoluyla ve muhtemelen yanlış bertarafından dolayı atıksuya boşaltılmaktadır. Parasetamol biyolojik

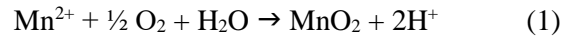
proseslerle oldukça etkili bir şekilde parçalanabilmekte, fakat hala fark edilebilir konsantrasyonlar atıksu arıtma tesisi çıkış sularında ya da yüzey sularında bulunmaktadır. Parasetamolün yaygın kullanımı atıksu arıtma tesislerinde parçalanabilmesine rağmen oldukça yüksek yüklerin doğal çevrelere erişmesini sağlamaktadır. Parasetamolün biyodegradasyonu günlerce hatta aylarca sürmektedir [2]. Ayrıca atıksu arıtma tesislerinde kullanılan klorlama prosesleriyle toksik bileşiklere dönüşebilirler. Bundan dolayı, sucul çevrelerde parasetamol varlığının sınırlandırılması için etkili arıtım proseslerinin geliştirilmesi gereklidir [3].



**Şekil 1.** Parasetamolün yapısı

Literatürde parasetamol giderimi için ozonlama, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV, TiO<sub>2</sub>/UV, elektrokimyasal ve foto-fenton gibi çeşitli arıtma yöntemleri önerilmektedir [4]. Ancak, ozonlama ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV ile pH 2.0-5.5 aralığında sadece sırasıyla %30 ve %40'a varan bir kısmı mineralizasyon elde edilmektedir. Bu nedenle tam olarak mineralizasyonu sağlayacak daha uygun metotların uygulanması gerekmektedir [5]. Organik mikrokirleticileri uzaklaştıracak etkili metotlardan bir tanesi de aktif karbonla sabit yatak kolon reaktörlerde adsorpsiyondur [6]. Adsorbent olarak aktif karbon su arıtımı için ilk seçimdir. Ancak yüksek maliyeti ve rejenerasyonundaki zorluklar küresel olarak bilim adamlarını alternatif adsorbentler aramaya zorlamaktadır [7]. Metal oksitler de sulardan kirleticilerin giderimi için kullanılmaktadır. Metal oksitlere dayalı adsorbentler farklı boyutlarda ve şekillerde, sorpsiyon özelliklerine katkı sağlayan farklı gözenek karakteristikleri sergileyen nanopartikül, mikropartikül, granül ve nanokompozit formunda elde edilmektedir [8]. Son yıllarda cazip bir geçiş metal oksit olarak mangan dioksit (MnO<sub>2</sub>) kimyasal, elektrokimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı

kataliz, moleküler adsorpsiyon, iyon değişimi, enerji depolama ve biosensör üretimi alanlarında kullanılmakta olan farklı morfolojiler (nanokablolar, nanoiğneler, nanotüpler, nanopartiküller vb.) sunmaktadır [9]. Mangan (Mn) dünyada en bol bulunan ikinci geçiş elementidir. Karasal çevrede mangan, Mn(II), Mn(III) ve Mn(IV) olarak bulunmaktadır. Mn (II)'nin Mn (IV)'e iki-elektronlu oksidasyonu, termodinamik olarak aşağıdaki denkleme göre oksijen varlığında gerçekleşir [10].



Mangan yüksek konsantrasyonlarda toksiktir ve birçok enzimatik reaksiyonda gerekli bir kofaktördür. Mn (II)'nin Mn (III/IV)'e oksidasyonu elementi çözünmüş türlerinden çok düşük çözünürlüklü katı bir faza dönüştürür [11]. Mangan oksitler, topraklarda, sedimentlerde ve deniz çevrelerinde yaygın oksitleyici bir maddedir. Son yıllarda, MnO<sub>2</sub>, fenolik bileşikler, aromatik N-oksitler, tetrasiklinler ve sentetik hormon 17 $\alpha$ -etinilestradiol gibi organik mikrokirleticileri gidermek için uygulanmaktadır [12,13]. Mangan dioksit adsorbent olarak yüksek bir potansiyele sahiptir [14].

Kesikli sistemlerde kirleticilerin adsorpsiyonu için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ancak adsorpsiyon prosesinin gerçek uygulanabilirliğini değerlendirmek için sabit yatak kolon reaktörlerde sürekli adsorpsiyon çalışmaları daha faydalı olmaktadır. Ayrıca büyük hacimlerde atıksu belirli miktarda adsorbent kolon reaktörde kullanılmasıyla sürekli olarak arıtılabilir [15]. Bu çalışmanın amacı sürekli bir sabit yatak kolon reaktörde reflüks yöntemle üretilmiş mangan oksit kullanarak parasetamol giderimidir. Sabit yatak kolon reaktör performansına akış hızı, parasetamol konsantrasyonu ve adsorbent dozajının etkileri incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Mangan oksit sentezi

Mangan oksit sentezi için reflüks metot kullanılmıştır [16]. 60 mmol MnSO<sub>4</sub>, 3 mL nitrik asitle birlikte 30 mL saf suda çözülmüştür. Sonra 38 mmol KMnO<sub>4</sub>'ün 100 mL saf suda

çözülmesiyle ikinci çözelti hazırlanmıştır. Bu çözelti ~100 °C'de koyu kahverengi bir çökelti oluşturmak için kuvvetli bir şekilde karıştırılan MnSO<sub>4</sub> çözeltisine damla damla ilave edilmiştir. Sulu çamur reflüks sıcaklıkta bir gece ısıtılmış, saf su ile yıkanmış ve 12 saat boyunca 120 °C'de kurutulmuştur.

## 2.2. Kolon reaktör deneyleri

Sabit yatak kolon reaktörde parasetamol giderimi için mangan oksitin performansı, 1 cm iç çap ve 5 cm yüksekliğinde cam kolon reaktör kullanılarak incelenmiştir. Mangan oksitin bilinen miktarı kolon reaktörde iki tabaka elyaf arasında sabitlenmiştir. Parasetamol çözeltisi peristaltik pompa (Lead Fluid BT/101S) kullanılarak sabit akış hızlarında kolon reaktör boyunca geçirilmiştir. Yukarı akış metodu kolon reaktör yatağında parasetamol çözeltisinin alıkonma süresini kontrolüne yardımcı olan kanal etkisini önlemek için benimsenmiştir. Adsorplanmamış parasetamolün ölçümü için belirli zaman aralıklarında örnekler toplanmış ve HPLC cihazında analizi yapılmıştır. Parasetamol çözeltisinde pH ayarı yapılmamıştır.

## 2.3. Parasetamol analizi

Parasetamol analizi Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografisi (HPLC) (Shimadzu) ile gerçekleştirilmiştir. Metotta mobil faz olarak metanol/ultrasafsu/asetik asit (35/65/0.1, v/v/v) karışımı kullanılmıştır. Akış hızı 0.4 mL/dk., dedektör dalga boyu: 243 nm ve örnekleme hacmi ise 30 µL olarak ayarlanmıştır. Kolonun tipi C18 5µm, 150x4.6 mm ve alıkonma süresi 5.31 dakikadır.

## 2.4. Kolon reaktör verilerinin analizi

Mangan oksit içeren sabit kolon reaktör boyunca parasetamol giderimi breakthrough eğrileriyle analizlenmiştir. Sorplanmış türlerin kolon reaktör çıkışında belirlenene kadar ki zaman (kırılma noktası) ve konsantrasyon-zaman profilinin şekli ya da kırılma eğrisi; adsorpsiyon kolonunun işletimi, dinamik cevabı ve proses dizaynı için çok önemli karakteristiklerdir. Çünkü bunlar adsorpsiyonun uygulanabilirlik ve ekonomisini doğrudan etkiler. Bu parametrelerin

deneysel belirlenmesi akış hızı, besleme kirletici konsantrasyonu ve yatak yüksekliği gibi kolon işletme şartlarına oldukça bağlıdır. Breakthrough eğrileri; zamana karşı giriş ve çıkış parasetamol konsantrasyonu oranını ( $C_i/C_o$ ) çizerek elde edilir. Breakthrough eğrisi dinamik şartlarda sabit yatak bir kolon reaktörün adsorpsiyon davranışını açıklar. Kırılma eğrisinde giriş parasetamol konsantrasyonunun % 5'i olan çıkış parasetamol konsantrasyonuna karşılık gelen zaman breakthrough (kırılma) zamanı ( $t_b$ ) olarak alınır.

Verilen bir akış hızı ve giriş konsantrasyonu için kolon reaktör tarafından adsorplanmış toplam miktar breakthrough eğrisinin altındaki alan ile ölçülebilir. Bu zaman ile ( $t$ , dk) adsorplanmış parasetamolün (giriş konsantrasyonu-çıkış konsantrasyonu= $C_{ad}$ ) miktarını entegre ederek hesaplanır. Toplam adsorplanmış parasetamol miktarı ( $q_{toplam}$ ) aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$q_{toplam} = \frac{QA}{1000} = \frac{Q}{1000} \int_{t=0}^{t=t_{toplam}} C_{ad} dt \quad (2)$$

Kolon reaktöre gönderilen parasetamolün toplam miktarı ise Denklem (3) kullanılarak hesaplanır.

$$m_{toplam} = \frac{C_0 Q t_{toplam}}{1000} \quad (3)$$

Kolon reaktörde dengede kirletici alımı ( $q_{denge}$ ) (ya da kolon kapasitesi), toplam akış süresinin sonunda adsorbentın gramı başına ( $X$ ) toplam adsorplanmış kirletici miktarı ( $q_{toplam}$ ) olarak aşağıdaki denklemle belirlenir.

$$q_{denge} = \frac{q_{toplam}}{X} \quad (4)$$

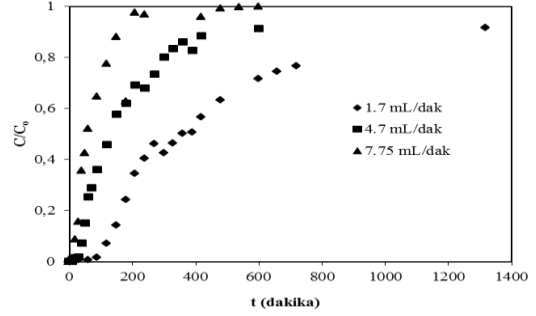
## 3. Sonuçlar

Bu çalışmada mangan oksite parasetamolün adsorpsiyonu sürekli bir sabit yatak kolon reaktörde akış hızı, giriş parasetamol konsantrasyonu ve adsorbent dozajının bir fonksiyonu olarak incelenmiştir.

### 3.1. Akış hızının etkisi

Mangan oksit kullanılarak parasetamol gideriminde akış hızının etkisi 1.7-7.8 mL/dk arasında değişen üç farklı akış hızlarında incelenmiştir. Parasetamol konsantrasyonu ve adsorbent miktarı sırasıyla 100 mg/L ve 1 g olarak seçilmiştir. Çeşitli zaman aralıklarında belirlenen parasetamol konsantrasyon değerleri ( $C$ ) başlangıç konsantrasyonlarına ( $C_0$ ) karşı oranlanıp zamana karşı grafiğe geçirilmiştir. Şekil 2’de çeşitli akış hızlarında konsantrasyon oranlarının ( $C/C_0$ ) zamanla değişimleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi adsorpsiyonun ilk anlarında bütün akış hızlarında parasetamolün tamamı adsorplanmaktadır. Daha sonra bütün akış hızları için zamanla kolon reaktör çıkışında parasetamol konsantrasyonu artmaya başlamaktadır. Bu olay tipik bir sabit yatak kolon reaktör adsorpsiyon karakteristiğidir (breakthrough eğrisi). Parasetamolün kolon reaktör çıkışındaki görülme anı akış hızına bağlıdır. Şekil 2’den görüldüğü gibi, 1.7, 4.7 ve 7.8 mL/dk akış hızları için kırılma ( $C/C_0=0.05$ ) yaklaşık olarak sırasıyla 120, 40 ve 20 dakikalarda meydana gelmiştir. Akış hızı arttıkça kırılma için gerekli zaman azalmıştır. Kırılma zamanındaki düşüş, sorbentin gözeneklerine çözünenin düşük difüzyonu ile sonuçlanan çözünen ve sorbent arasındaki nispeten düşük temas süresinden kaynaklanabilir [17]. Akış hızı toplam adsorplanmış parasetamol miktarı ve kolon reaktöre gönderilen toplam parasetamol miktarını da etkilemiştir. 1.7, 4.7 ve 7.8 mL/dk akış hızlarında toplam adsorplanmış parasetamol miktarları sırasıyla; 72.5, 68.0 ve 54.5 mg iken kolon reaktöre gönderilen toplam parasetamol miktarları ise 209.9, 159.9 ve 153.2 mg olarak belirlenmiştir. Akış hızının artmasıyla toplam adsorplanmış parasetamol miktarı azalmıştır. Bu özellik yüksek akış hızlarında adsorbentın gözeneklerine parasetamolün difüzyonunun kısıtlanmasından ve kolon reaktör içinde parasetamolün alıkonma süresinin yetersizliğinden kaynaklanabilir [17-18]. Düşük akış hızlarında artan alıkonma zamanı ile birlikte sorpsiyon kapasitelerinin artışı, sorpsiyon prosesinin partikül içi kütle transferiyle kontrol edildiğini gösterir [17]. Elde edilen sonuçlara göre parasetamol giderimi için en düşük akış hızının seçilmesi tavsiye edilir. Ancak çok düşük

akış hızı işletme sürelerinin uzamasına ve maliyetin artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle sonraki çalışmalarda 4.7 mL/dk akış hızı uygun olarak seçilmiştir.

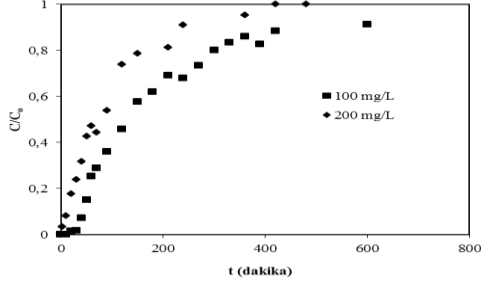


Şekil 2. Mangan oksite parasetamolün adsorpsiyonunda farklı besleme akış hızlarında elde edilen kırılma eğrileri ( $C_0=100$  mg/L, adsorbent dozajı: 1 g)

### 3.2. Parasetamol konsantrasyonunun etkisi

Sabit yatak kolon reaktörde mangan oksit ile parasetamol giderimine başlangıç parasetamol konsantrasyonunun etkisi 4.7 mL/dk sabit akış hızında 100 ve 200 mg/L başlangıç parasetamol konsantrasyonlarında incelenmiştir. Şekil 3’de kırılma eğrileri verilmiştir. Düşük parasetamol konsantrasyonunda kırılma daha yavaş ortaya çıkmıştır. 100 ve 200 mg/L parasetamol konsantrasyonlarında kırılma zamanı değerleri sırasıyla 40 ve 10 dakika olarak bulunmuştur. Yatağın doygunluğu başlangıç parasetamol konsantrasyonunun artışıyla daha hızlıdır. Yüksek parasetamol konsantrasyonlarında bağlama bölgeleri parasetamol ile daha hızlı bir şekilde dolmuştur. Buda kırılma zamanında bir azalmaya neden olmaktadır. Adsorpsiyonda sürücü güç başlangıç konsantrasyonunun artışı ile artar. Sonuç olarak sorpsiyon bölgeleri yüksek konsantrasyonlarda daha hızlı doyar [19]. Parasetamol konsantrasyonunun artmasıyla toplam adsorplanmış parasetamol miktarı ve kolon reaktöre gönderilen toplam parasetamol miktarı da artmıştır. 100 ve 200 mg/L parasetamol konsantrasyonlarında toplam adsorplanmış parasetamol miktarı sırasıyla 68.0 ve 98.7 mg ve kolon reaktöre gönderilen toplam parasetamol miktarları sırasıyla 159.9 ve 341.0 mg olarak belirlenmiştir. Adsorpsiyonda çözünen maddenin sorbent ve çözelti arasındaki konsantrasyon farkı itici bir güç sağlar. Yüksek

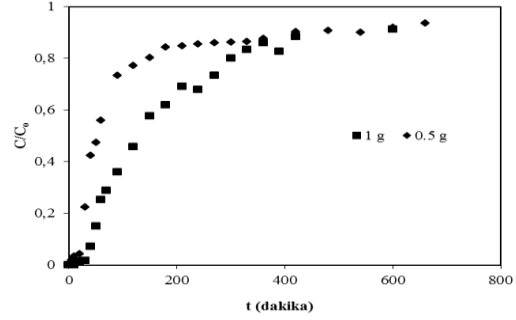
konsantrasyon farkı adsorpsiyon prosesinde yüksek bir sürücü güç sağlar. Böylece parasetamol konsantrasyonlarının artışıyla daha yüksek adsorpsiyon kapasiteleri elde edilir.



**Şekil 3.** Mangan oksite parasetamolün adsorpsiyonunda farklı parasetamol konsantrasyonlarında elde edilen kırılma eğrileri (Besleme akış hızı:4.7 mL/dk, adsorbent dozajı:1 g)

### 3.3. Adsorbent dozajının etkisi

Adsorpsiyon adsorbentin miktarına da bağlıdır. Çünkü adsorbent miktarı sorpsiyon için mevcut aktif bölgelerin sayısını belirler [19]. Adsorbent miktarının etkisi 100 mg/L başlangıç parasetamol konsantrasyonu kullanılarak 4.7 mL/dk akış hızında 0.5 ve 1 g adsorbent dozajında incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde elde edilen kırılma eğrileri Şekil 4'de verilmiştir. Adsorbent dozajının 0.5 g'dan ve 1 g değerine artması ile kırılma zamanları sırasıyla 20'den 40 dakikaya artmıştır. Yüksek adsorbent dozajlarında toplam yüzey alanı artar [20]. Bu da adsorpsiyon için sorpsiyon alanlarında bir artışa neden olur. Adsorbent dozajının artmasıyla toplam adsorplanmış parasetamol miktarı da ve kolon reaktöre gönderilen toplam parasetamol miktarları artmıştır. 0.5 ve 1 gram adsorbent dozajlarında toplam adsorplanmış parasetamol miktarı 46.5 ve 68.0 mg ve kolon reaktöre gönderilen parasetamol miktarı sırasıyla 102.1 ve 159.9 mg olarak belirlenmiştir. Adsorbent dozajının artması ile toplam adsorplanmış parasetamol miktarı kalma süresinin ve yüzey alanının artışına bağlı olarak artmıştır [21-23].



**Şekil 4.** Mangan oksite parasetamolün adsorpsiyonunda farklı adsorbent dozajlarında elde edilen kırılma eğrileri (Besleme akış hızı:4.7 mL/dk,  $C_0=100$  mg/L)

## 4. Tartışma

Bu çalışmada reflüks metotla üretilmiş mangan oksit kullanılarak sulu çözeltilerden parasetamol giderimi sürekli akışlı sabit yataklı kolon reaktörde incelenmiştir. Akış hızının artmasıyla toplam adsorplanmış parasetamol miktarı ve kolon reaktöre gönderilen toplam parasetamol miktarı azalmıştır. Ancak parasetamol konsantrasyonu ve adsorbent dozajının artmasıyla toplam adsorplanmış parasetamol miktarı ve kolon reaktöre gönderilen toplam parasetamol miktarı artmıştır. Yapılan çalışmada; sabit yatak kolon reaktörde sulu çözeltilerden parasetamolün sürekli giderimi için reflüks metotla üretilen mangan oksitin kullanılabilceği ve mangan oksitin uygun bir adsorbent olduğu sonucuna varılmıştır.

## 5. Kaynaklar

- Li, J., Ye, Q., Gan, J. (2014). Degradation and transformation products of acetaminophen in soil. *Water Research*, **49**:44-52.
- De Laurentiis, E., Prasse, C., Ternes, T. A., Minella, M., Maurino, V., Minero, C., Sarakha, M., Brigante, M., Vione, D. (2014). Assessing the photochemical transformation pathways of acetaminophen relevant to surface waters: Transformation kinetics, intermediates, and modelling. *Water Research*, **53**: 235-248.
- Carrasco-Díaz, M.R., Castillejos-López, E., Cerpa-Naranjo, A., Rojas-Cervantes, M.L. (2016). Efficient removal of paracetamol using  $LaCu_{1-x}MxO_3$  (M = Mn, Ti) perovskites as heterogeneous Fenton-like catalysts. *Chemical Engineering Journal*, **304**: 408-418.

4. Trovó, A.G., Pupo Nogueira, R.F., Aguera, A., Fernandez-Alba, A.R., Malato, S. (2012). Paracetamol degradation intermediates and toxicity during photo-Fenton treatment using different iron species. *Water Research*, **46**: 5374-5380.
5. Brillas, E., Sires, I., Arias, C., Cabot, P.L., Centellas, F., Rodriguez, R.M., Garrido, J.A. (2005). Mineralization of paracetamol in aqueous medium by anodic oxidation with a boron-doped diamond electrode. *Chemosphere*, **58**: 399-406.
6. García-Mateos, F.J., Ruiz-Rosas, R., Marqués, M.D., Cotoruelo, L.M., Rodríguez-Mirasol, J., Cordero, T. (2015). Removal of paracetamol on biomass-derived activated carbon: Modeling the fixed bed breakthrough curves using batch adsorption experiments. *Chemical Engineering Journal*. **279**: 18-30.
7. Chaudhry, S.A., Khan, T.A., Ali, I. (2017). Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of Cr(VI) adsorption from aqueous solution onto manganese oxide coated sand grain (MOCSG). *Journal of Molecular Liquids*, **236**: 320-330.
8. Ocinski, D., Jacukowicz-Sobala, I., Mazur, P., Raczkyk, J., Kociołek-Balawejder, E. (2016). Water treatment residuals containing iron and manganese oxides for arsenic removal from water – Characterization of physicochemical properties and adsorption studies. *Chemical Engineering Journal*, **294**: 210-221.
9. Ahn, M.-S., Ahmad, R., Yoo, J.-Y., Hahn, Y.-B. (2018). Synthesis of manganese oxide nanorods and its application for potassium ion sensing in water. *Journal of Colloid and Interface Science*, **516**: 364-370.
10. Tebo, B.M., Bargar, J.R., Clement, B.G., Dick, G.J., Murray, K.J., Parker, D., Verity, R., Webb, S.M. (2004). Biogenic manganese oxides: Properties and mechanisms of formation. *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, **32**: 287-328.
11. Tebo, B.M., Ghiorse, W.C., vanWaasbergen, L.G., Siering, P.L., Caspi, R. (1997). Bacterially mediated mineral formation: Insights into manganese(II) oxidation from molecular genetic and biochemical studies. *Geomicrobiology: Interactions Between Microbes and Minerals*, Banfield, J.F. and Nealson, K.H., Eds., Mineralogical Society of America, Washington, D.C., p. 225.
12. Zeiner, C.A., Lion, L.W., Shuler, M.L., Ghirose, W.C., Hay, A. (2006). Cycling of biogenic Mn-oxides in a model microbial predator-prey system. *Geomicrobiology Journal*, **23**: 37-43.
13. Forrez, I., Carballa, M., Verbeken, K., Vanhaecke, L., Schlüsener, M., Ternes, T., Boon, N., Verstraete, W. (2010). Diclofenac oxidation by biogenic manganese oxides. *Environmental Science and Technology*, **44**: 3449-3454.
14. Samarghandi, M.R., Al-Musawi, T.J., Mohseni-Bandpi, A., Zarrabi, M. (2015). Adsorption of cephalexin from aqueous solution using natural zeolite and zeolite coated with manganese oxide nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*, **211**: 431-441.
15. Abdolali, A., Ngo, H.H., Guo, W., Zhou, J.L., Zhang, J., Liang, S., Chang, S.W., Nguyen, D.D., Liu, Y. (2017). Application of a breakthrough biosorbent for removing heavy metals from synthetic and real wastewaters in a lab-scale continuous fixed-bed column. *Bioresource Technology*, **229**: 78-87.
16. Duan, L., Sun, B., Wei, M., Luo, S., Pan, F., Xu, A., Li, X. (2015). Catalytic degradation of Acid Orange 7 by manganese oxide octahedral molecular sieves with peroxymonosulfate under visible light irradiation. *Journal of Hazardous Materials*, **285**: 356-365.
17. Aksu, Z., Çağatay, Ş.Ş., Gönen, F. (2007). Continuous fixed bed biosorption of reactive dyes by dried *Rhizopus arrhizus*: Determination of column capacity. *Journal of Hazardous Materials*, **143**: 362-371.
18. Aksu, Z., Gönen, F. (2004). Biosorption of phenol by immobilized activated sludge in a continuous packed bed: prediction of breakthrough curves. *Process Biochemistry*, **39**: 599-613.
19. Bhaumik, M., Setshedi, K., Maity, A., Onyango, M.S. (2013). Chromium(VI) removal from water using fixedbed column of polypyrrole/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite. *Separation and Purification Technology*, **110**: 11-19.
20. Nazari, G., Abolghasemi, H., Esmaili, M., Pouya, E.S. (2016). Aqueous phase adsorption of cephalexin by walnut shell-based activated carbon: A fixed-bed column study. *Applied Surface Science*, **375**: 144-153.
21. Smaranda, C., Popescu, M.-C., Bulgariu, D., Malutan, T., Gavrilesu, M. (2017). Adsorption of organic pollutants onto a Romanian soil: Column dynamics and transport. *Process Safety and Environmental Protection* **108**: 108-120.
22. Koçyiğit, H. (1999). Sulardaki kadmiyum kirliliğinin dolgulu kolonlarda adsorpsiyon yolu ile giderilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
23. Malkoç, E., Nuhoğlu, Y. (2006). Palamut meşesi (*quercus ithaburensis*) atığı ile sabit yataklı kolonda Cr(VI) biyosorpsiyonu. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, **8(2)**: 31-45.

## Mekanik Bir Sistemin Bir Ters Rezonans Frekansının Kütle Eklenerek Değiştirilmesi

Orhan ÇAKAR

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
cakaro@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 16.02.2018; Kabul/Accepted: 08.06.2018)

### Özet

Ters rezonans frekansı mekanik sistemlerin dinamik özelliklerinden biridir ve frekans tepki fonksiyonu grafiklerinde ters tepeler olarak gözüktürler. Bir yapı belirli bir noktadan ters rezonans frekansındaki harmonik bir kuvvet ile tahrik edildiğinde yapının belirli noktaları titreşim hareketi yapmayabilir. Bu bakımdan bazı titreşim problemlerinin çözümünde bu özellikten faydalanılmaktadır. Bu çalışmada mevcut bir sistemin noktasal veya çapraz frekans tepki fonksiyonlarında belirli bir ters rezonansı kütle eklemek suretiyle başka bir frekansa kaydırma üzerine bir yöntem sunulmuştur. Yöntem matematikten bilinen Sherman-Morrison formülüne dayalı olup orijinal sistemin frekans tepki fonksiyonlarını kullanmaktadır. Bu yöntem sistemin fiziksel özelliklerinin veya modal özelliklerinin bilinmesine gerek duymadığından oldukça avantajlıdır. Yöntemin geçerliliği ve etkinliği altı serbestlik dereceli bir sistem üzerinde gerçekleştirilen çeşitli sayısal uygulamalarla gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Titreşim, Ters rezonans, Doğal frekans, Yapısal değişiklik, Frekans Tepki Fonksiyonu, Sherman-Morrison formülü

## Changing One of the Anti-Resonance Frequencies of A Mechanical System by a Point Mass Modification

### Abstract

The anti-resonance frequency is one of the dynamic properties of a mechanical system and it looks like a valley in frequency response functions. When a structure with an anti-resonance at a specific point is excited by a harmonic force, some of the points on the structure may not vibrate. This property is exploited for the solution of some vibration problems. In this study, a method for shifting a specific anti-resonance frequency appearing on a point or transfer frequency response function of a mechanical system by adding a point mass on a pre-specified position is presented. The proposed method is based upon Sherman-Morrison formula and uses frequency response functions of the original system. The method is quite practical as the physical or modal model of the system is not needed. The validity and effectiveness of the method are demonstrated by various numerical simulations performed using a six degree-of-freedom system.

**Keywords:** Vibration, Anti-resonance, Natural frequency, Structural modification, Frequency Response Function, Sherman-Morrison formula.

### 1. Giriş

Bir yapı doğal frekanslarında harmonik bir kuvvet ile tahrik edildiğinde yüksek genliklerde titreşim hareketi yapar. Bu *rezonans* olarak bilinir. Diğer taraftan bazı durumlarda yapı üzerindeki bir noktadan uygulanan harmonik kuvvete karşı yapının bir başka noktasında titreşim hareketi oluşmaz. Bu duruma karşılık gelen frekanslar *ters rezonans* (anti-resonance) frekansları olarak tanımlanır. Bu özellikten titreşim problemlerinin çözümünde faydalanılmaktadır. Örneğin belirli bir frekansta

çeşitli konumları (bölgeleri) yüksek genliklerde titreşim yapan bir sistemde bu konum ve frekanslarda ters rezonanslar oluşturulabilirse buradaki titreşim sorunu çözülebilir.

Rezonans frekansları, diğer adı ile doğal frekanslar, sistemin frekans tepki fonksiyonlarının (FTF'lerinin) frekans-genlik grafiklerinde yüksek tepeler şeklinde gözüktürken, ters rezonans frekansları derin yarıklar şeklinde veya bir başka deyişle ters tepeler olarak gözüktürler. Rezonans frekansları yapının global bir özelliği olup düğüm noktaları hariç yapı üzerinde tüm noktalara ait FTF'lerde gözüktürler.

Ancak ters rezonanslar yerel özelliştir ve yapı üzerinde seçilen noktalara göre değişiklik göstermektedir. Yani seçilen bir veya iki nokta için bir ters rezonans frekansı diğer bir noktada ters rezonans frekansı olmayabilir. Rezonans ve ters rezonans frekansları yapının dinamik özellikleridir ve o yapının kütle, katılık ve sönüm gibi fiziksel özelliklerine bağlıdır.

Mühendislik uygulamalarında bazen mevcut bir yapı üzerinde fiziksel değişiklikler yapılması gerekebilir. Bu genellikle mevcut bir yapıda iyileştirme yapılması veya yeni ünite eklenmesi ihtiyacından kaynaklanır. Böyle bir durumda yapının dinamik özelliklerinin değişmesi kaçınılmazdır ve yapılan bu değişiklikler sonucunda ortaya çıkan yeni yapının dinamik özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Bir yapıda yapılan kütle, katılık ve sönüm değişikliklerinden sonra elde edilen yeni yapının dinamik özelliklerinin belirlenmesi *düz yapısal değişiklik* olarak adlandırılmaktadır. Tersine, bir yapının istenilen dinamik özelliklere sahip olması için gerekli kütle, katılık ve sönüm özelliklerinin belirlenmesi işlemi de *ters yapısal değişiklik* olarak adlandırılmaktadır. Araştırmacılar düz ve ters yapısal değişiklik uygulamalarında kullanılmak üzere etkili ve pratikte uygulanabilir yöntemlerin geliştirilmesi için çaba göstermektedirler [1-8]. Geliştirilen bu yöntemler incelenen yapının fiziksel özelliklerinin, modal özelliklerinin veya cevap özelliklerinin yani FTF'lerinin kullanımına dayalıdır. Bunun yanında duyarlılık özelliğini kullanan ve iteratif olarak işlem yapan yöntemler de bulunmaktadır. Bunlar arasında pratik uygulamalara en elverişli olanların FTF'lerin kullanımına dayalı olanların olduğu söylenebilir. Çünkü FTF'ler doğrudan mevcut yapı üzerinde ölçülürler ve bu yöntemlerin kullanımında yapının fiziksel veya modal özelliklerinin bilinmesine ihtiyaç duyulmamaktadır.

Bir sistemin doğal frekanslarının istenilen değerlere kaydırılması veya yeni modların oluşturulması için gerekli yapısal değişikliklerin bulunması ters yapısal değişikliğin uygulama alanlarından biridir ve bu konuda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir [9-18]. Çakar [19], bir sistemin bir veya daha fazla doğal frekansının kütle eklenerek belirli frekanslara kaydırılması için bir yöntem sunmuştur. Ters rezonansların istenilen değerlere atanması veya kaydırılması da

araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Mottershead [20], ters rezonans frekanslarının duyarlılığını incelemiş, ters rezonansların doğal frekans ve mod biçimlerine duyarlı olduğunu ve bunların lineer kombinasyonu olarak ifade edilebildiğini göstermiştir. Mottershead ve Lallemand [21], tek bir yay değişikliği ile bir transfer FTF üzerinde bir rezonans frekansını hemen yanındaki bir ters rezonansına kaydırarak bu rezonans frekansının ilgili FTF'de kaybolmasını sağlamışlardır. Mottershead [22], kütle ve yay değişiklikleri ile noktasal veya çapraz FTF'lerdeki ters rezonansların istenilen frekanslara atanması için genel bir yöntem sunmuştur. Sunulan yöntemde sistemin reseptansları kullanılmaktadır. Mottershead vd. [23], kütle veya yere bağlı yay değişiklikleri ile bir sistemde düğüm noktaları oluşturulması için FTF'lerin kullanımına dayalı bir yöntem sunmuşlardır. Prells vd. [24], tek bir değişiklik ile doğal frekans ve ters rezonansların kaydırılabilirliğini incelemiştir.

Bu çalışmada, bir yapının noktasal veya çapraz FTF'lerinde bir ters rezonansın kütle değişikliği ile istenilen bir değere kaydırılması problemi incelenmiştir. Bu kaydırmayı gerçekleştirecek kütle hesabı için Sherman-Morrison (SM) [25] formülüne dayalı bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntem ilk sistemin kısıtlı sayıdaki FTF'lerini kullanmaktadır. Aşağıdaki bölümlerde ilk önce geliştirilen yöntemin teorisi verilmiş ve sonrasında sayısal uygulamalar ile yöntemin geçerliliği ve etkinliği gösterilmiştir.

## 2. Teori

Yapısal değişikliğe uğramış bir sistemin reseptans (deplasman/kuvvet) tipindeki FTF matrisi  $[\alpha^*]$ , ilk sistemin FTF matrisi  $[\alpha]$  ve yapılan değişikliklere bağlı olarak SM formülü ile aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir [26-27]:

$$[\alpha^*] = [\alpha] - \frac{([\alpha]\{u\})(\{v^T\}[\alpha])}{1 + \{v^T\}[\alpha]\{u\}} \quad (1)$$

Burada  $\{u\}$  ve  $\{v\}$  yapılan değişiklikleri ihtiva eden vektörler ve  $\{.\}^T$  vektörün transpozudur. Sistemin  $r$  koordinatında bir  $\delta m$  kütle değişimi yapıldığında  $\{u\}$  ve  $\{v\}$  vektörlerinin  $r$  koordinatındaki elemanları  $u_r=1$ ,



$v_r = -\omega^2 \delta m$ ; diğer elemanları ise sıfırdır. Kare ve simetrik olan FTF matrisi sadece aktif koordinatları ( $a$ ) yani ölçüm ve değişim koordinatlarını kapsayacak biçimde yazılabilir [28]:

$$[\alpha_a^*] = [\alpha_a] - \frac{([\alpha_a]\{u\})(\{v^T\}[\alpha_a])}{1 + \{v^T\}[\alpha_a]\{u\}} \quad (2)$$

Değiştirilmiş sistemin FTF matrisindeki elemanlardan sadece biri, örneğin  $p$  ve  $q$  koordinatları için değişim koordinatı  $r$  olmak üzere aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\alpha_{pq}^* = \frac{\alpha_{pq} - \omega^2 \delta m (\alpha_{rr} \alpha_{pq} - \alpha_{pr} \alpha_{rq})}{1 - \omega^2 \delta m \alpha_{rr}} \quad (3)$$

FTF frekansa bağlı olduğundan ilgilenilen frekans aralığındaki her  $\omega$  değeri için hesaplanacağı unutulmamalıdır. Burada kısalık bakımından örneğin  $\alpha_{pq}(\omega)$  yerine  $\alpha_{pq}$  yazılmıştır. Daha önce ifade edildiği gibi rezonans frekanslarında FTF grafiğinde tepeler, ters rezonans frekanslarında ise ters tepeler oluşur. Rezonans frekansları kutuplar (pole), ters rezonanslar ise sıfırlar (zeros) olarak da ifade edilir. Denklem (3) incelendiğinde değiştirilmiş bir sistemin rezonans frekanslarında FTF genliklerinde tepe olması için bu denklemin paydasının sıfır olması gerekir. Diğer taraftan herhangi bir FTF için ters rezonans tepeleri yani sıfırların oluşması için o frekans değerlerinde denklemindeki pay kısmının sıfır olması gerekir. Buna göre,  $r$  koordinatına kütle eklenerek değiştirilmiş bir sistemin  $\alpha_{pq}$  reseptansının bir  $\omega_s$  frekansında ters rezonansa sahip olması için (3) denkleminin payı bu frekans değeri için sıfıra eşitlenir:

$$\alpha_{pq} - \omega_s^2 \delta m (\alpha_{rr} \alpha_{pq} - \alpha_{pr} \alpha_{rq}) = 0 \quad (4)$$

Buradan,  $r$  koordinatına eklenmesi gereken kütle kolayca aşağıdaki formülle doğrudan hesaplanabilir:

$$\delta m = \frac{\alpha_{pq}}{\omega_s^2 (\alpha_{rr} \alpha_{pq} - \alpha_{pr} \alpha_{rq})}, \quad p, q \neq r \quad (5)$$

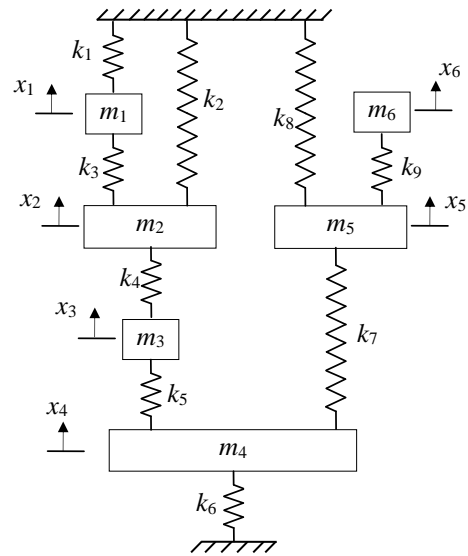
Şayet, herhangi bir noktasal FTF için ters rezonans oluşturulmak istenirse, mesela  $p$  koordinatı için, aşağıdaki ifade elde edilebilir:

$$\delta m = \frac{\alpha_{pp}}{\omega_s^2 (\alpha_{rr} \alpha_{pp} - \alpha_{pr} \alpha_{rp})}, \quad p \neq r \quad (6)$$

Dikkat edilirse burada sadece değişiklik koordinatları ile ilgili reseptanslara ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulan bu reseptanslar da sayısal olarak hesaplanabilir veya deneysel uygulamalarda ölçülerek elde edilebilirler.

### 3. Sayısal Uygulama

Bu bölümde, sunulan yöntemin geçerliliği çeşitli sayısal uygulamalarla gösterilmeye çalışılmıştır. Bunun için birçok yapısal değişiklik çalışmalarında [19, 21-23] kullanılan ve Şekil 1'de verilen altı serbestlik dereceli kütle-yay sistemi dikkate alınmıştır. Sistemdeki tüm yayların yay sabitleri 1 N/m ve kütleler 1 kg kabul edilmiştir.



Şekil 1. Altı serbestlik dereceli kütle-yay sistemi [21-23].

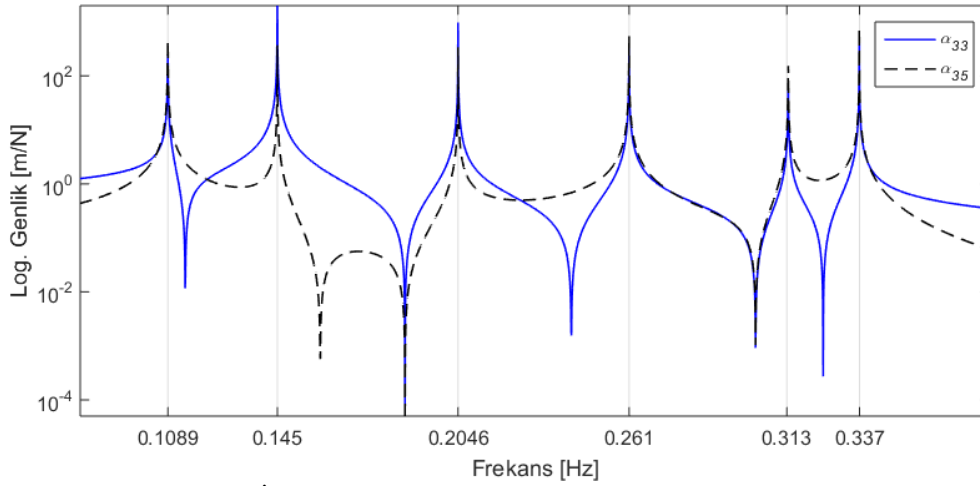
MATLAB<sup>®</sup> yazılımı kullanılarak sistemin özdeğer problemi çözülmüş ve sistemin belirlenen doğal frekansları ve mod biçimleri Tablo 1'de verilmiştir. Sunulan yöntem FTF'leri

kullandığından, sistemin reseptans tipindeki FTF'leri 0-0.3 Hz frekans aralığında  $10^{-4}$  Hz adımlarla elde edilmiştir. Bunlardan  $\alpha_{33}$  ve  $\alpha_{35}$  Şekil 2'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi noktasal

FTF'de her rezonans tepesinden sonra bir ters rezonans oluşmaktadır. Çapraz FTF'de ise üç tane ters rezonans olup bunlardan iki tanesi noktasal FTF'dekiler ile çakışmaktadır.

**Tablo 1.** İlk sistemin doğal frekansları ve mod biçimleri

Mod	1	2	3	4	5	6
$\omega$ (Hz)	0.1089	0.1450	0.2046	0.2610	0.3135	0.3369
Mod biçim vektörleri	0.0962	-0.4027	0.7451	-0.3310	-0.3761	-0.1496
	0.1473	-0.4712	0.2588	0.2280	0.7068	0.3711
	0.2769	-0.6199	-0.3965	0.4019	-0.2455	-0.4001
	0.2769	-0.2541	-0.3965	-0.5049	-0.2455	0.6216
	0.4242	0.0685	-0.1377	-0.5590	0.4613	-0.5206
	0.7973	0.4027	0.2110	0.3310	-0.1602	0.1496



**Şekil 2.** İlk sistemin noktasal ve çapraz FTF'leri:  $\alpha_{33}$  (-),  $\alpha_{35}$  (--).

İlk uygulama olarak 3 koordinatına ait noktasal FTF'de 5 koordinatına bir kütle ekleyerek keyfi seçilen 0.22 Hz frekansında bir ters rezonans frekansı oluşturulmaya çalışılacaktır. Bunun için gerekli kütle doğrudan Denklem (6) ile bulunabilir. Gerekli olan reseptans tipindeki FTF'lerin 0.22 Hz frekansındaki değerleri matris olarak aşağıda verilmiştir:

$$[\alpha(0.22)] = \begin{bmatrix} \alpha_{33} & \alpha_{35} \\ \alpha_{53} & \alpha_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.7175 & -0.5189 \\ -0.5189 & 0.4126 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Denklem (6) yardımıyla 5 koordinatına eklenmesi gereken kütle

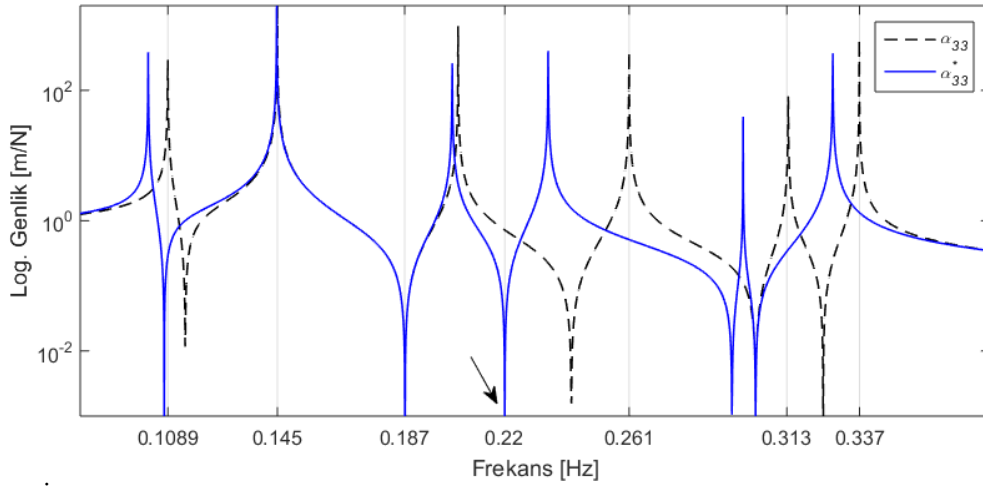
$$\delta m = \frac{(-0.7175)}{(2\pi(0.22))^2 \left( (-0.7175)(0.4126) - (-0.5189)^2 \right)} = 0.664 \text{ kg}$$

olarak bulunur. Bu kütle ilk sisteme eklenerek değiştirilmiş sistemin FTF'leri (2) denklemi yardımıyla elde edilmiştir. Değiştirilmiş sistemin 3 koordinatına ait noktasal FTF'si ( $\alpha_{33}^*$ ) ilk sistemdeki ( $\alpha_{33}$ ) ile Şekil 3'te karşılaştırılmıştır. Beklendiği gibi bu kütle eklenmesiyle ilk sistemin doğal frekansları ve ters rezonans frekansları daha küçük değerlere doğru kaymıştır. Değiştirilmiş sistemin noktasal FTF'sinin 0.22 Hz frekansında bir ters rezonansa sahip olduğu açıkça görülmektedir. İlk sistemin FTF'sine bakıldığında bu frekansın hemen üstünde 0.24 Hz frekansında bulunan ters rezonansın kütle eklenmesiyle 0.22 Hz

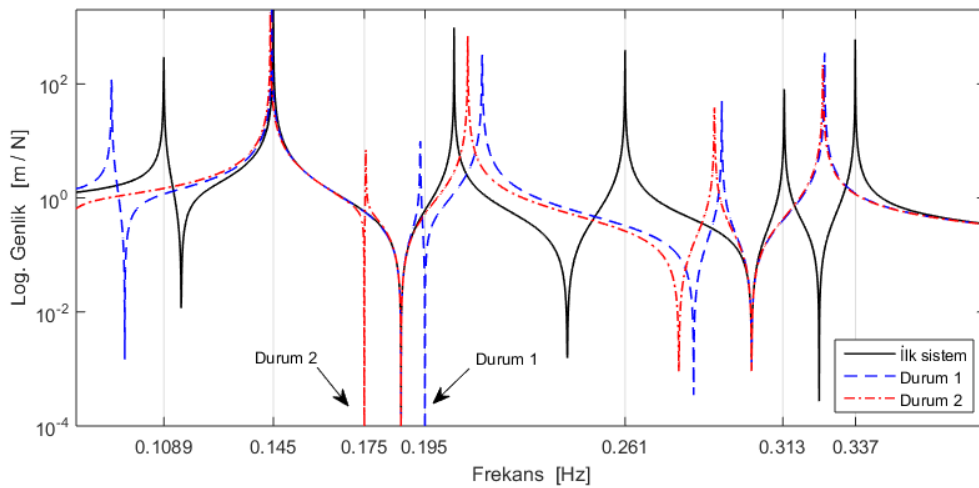
frekansına kaydığı anlaşılmaktadır. Dikkat edilirse ikinci doğal frekans (0.145 Hz) ve hemen sağındaki ters rezonans frekansı (0.187 Hz) bu değişimden etkilenmemiştir. Bu durum, bu modun 5 koordinatındaki değişimlere duyarlı olduğunu gösterir. Bir başka deyişle 5 koordinatı ikinci mod için düğüm yani hareketsiz noktadır. Tablo 1’de verilen mod biçim vektörlerine bakıldığında, ikinci modda 5 koordinatının genliğinin diğerlerine göre oldukça küçük olduğu görülebilir.

Aynı FTF ve değişim koordinatı için 0.187 Hz frekansının biri sağında (Durum 1: 0.195 Hz) ve biri de solunda (Durum 2: 0.175 Hz) olmak

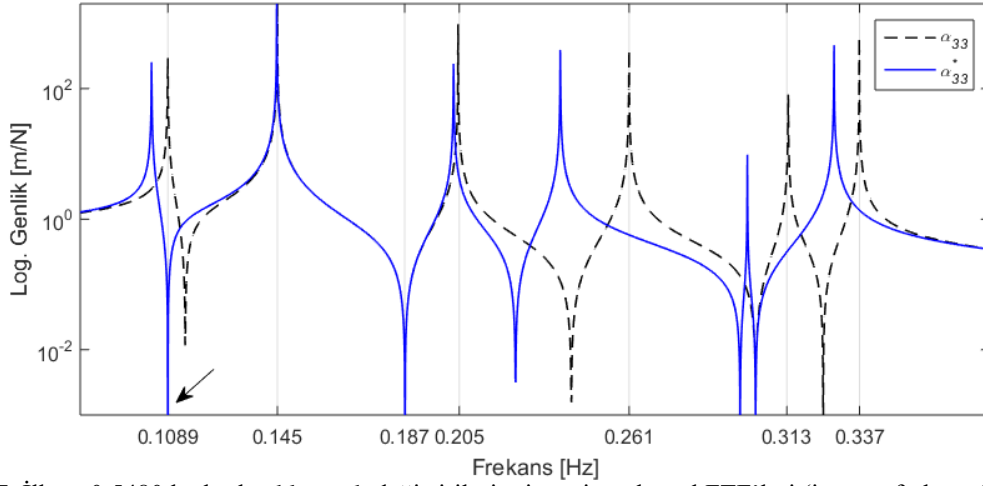
üzere iki farklı durum göz önüne alınmıştır. Bu durumlar için eklenmesi gereken kütleler sırasıyla 1.8832 kg ve 4.9766 kg olarak belirlenmiştir. Her bir değişiklik ayrı ayrı uygulanıp elde edilen değiştirilmiş sistemlerin FTF’leri Şekil 4’te karşılaştırılmıştır. Grafikler incelendiğinde, her iki durum için sistemin istenilen frekanslarda ters rezonansa sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca her iki durumda ikinci doğal frekansın (0.185 Hz) ve onu takip eden ters rezonans frekansının (0.1871 Hz) değişmeyip üçüncü doğal frekansı takip eden 0.242 Hz frekansındaki ters rezonansın istenilen değerlere kaydığı görülmektedir.



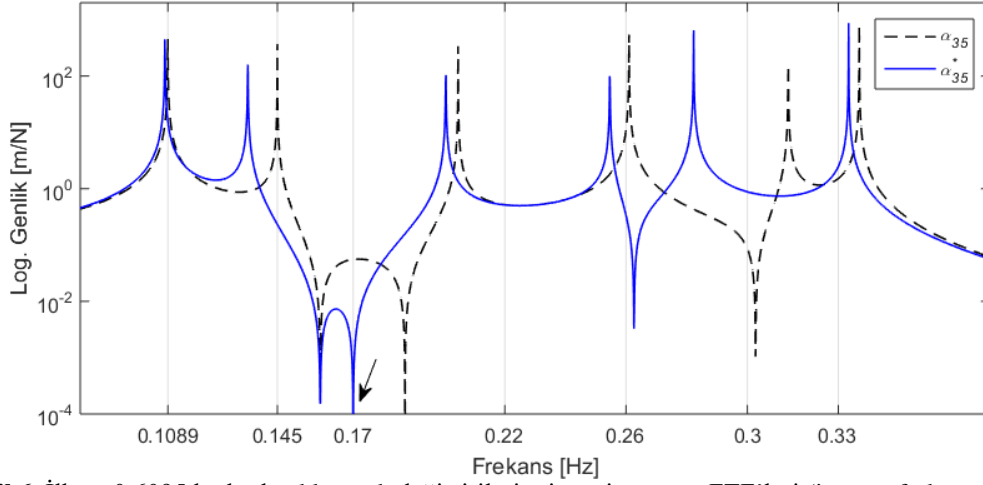
Şekil 3. İlk ve 0.664 kg kütle eklenerek değiştirilmiş sistemin noktasal FTF’leri (istenilen frekans 0.22 Hz, değişiklik koordinatı:5).



Şekil 4. İki farklı kütle eklenerek değiştirilmiş sistemin noktasal FTF’leri ( $\alpha_{33}^*$ ). (Durum 1: 1.883 kg, Durum 2: 4.976 kg, değişiklik koordinatı: 5)



Şekil 5. İlk ve 0.5480 kg kütle eklenerek değiştirilmiş sistemin noktasal FTF'leri (istenen frekans 0.1089 Hz, değişiklik koordinatı:5).



Şekil 6. İlk ve 0.6095 kg kütle eklenerek değiştirilmiş sistemin çapraz FTF'leri (istenen frekans 0.17 Hz, değişiklik koordinatı:2).

Diğer bir uygulama olarak aynı noktasal FTF için bu defa özel olarak ilk sistemin birinci doğal frekansı olan 0.1089 Hz frekansında yine 5 koordinatına bir kütle ekleyerek bir ters rezonans frekansı oluşturulmaya çalışılacaktır. Bu frekansta ters rezonans oluşturulması halinde bu rezonans frekansında sistem üzerindeki 3 koordinatının hareketsiz kalması sağlanabilecektir. Bunun için eklenmesi gereken kütle Denklem (6) ile 0.5480 kg olarak hesaplanmıştır. Bu kütle orijinal sisteme eklenerek değiştirilmiş sistemin FTF'leri (2) denklemi yardımıyla elde edilmiş, ilk sistemin ve değiştirilmiş sistemin 3 koordinatına ait noktasal FTF'leri Şekil 5'te karşılaştırılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi son sistemin noktasal FTF'si 0.1089 Hz frekansında bir ters rezonansa sahiptir. İlk sistemin FTF'sine bakıldığında bu

frekansın hemen sağındaki ters rezonansın kütle eklenmesiyle istenilen değere kaydığı, bununla beraber birinci doğal frekansın da 0.1035 Hz değerine kaydığı görülmektedir.

Son bir uygulama olarak 3 ve 5 koordinatları arasındaki çapraz FTF dikkate alınmıştır. Bu FTF'nin 0.17 Hz frekansında bir ters rezonansa sahip olması istenmektedir. Bunun için 2 koordinatına bir kütle eklenecektir. Eklenmesi gereken kütle Denklem (5) ile 0.6095 kg olarak hesaplanmıştır. Bu kütle sisteme eklenmesiyle elde edilen yeni sistemin FTF'si Şekil 6'da ilk sistemin FTF'si ile birlikte verilmiştir. Görüldüğü gibi bu FTF 0.17 Hz frekansında ters rezonansa sahiptir. Eklenen kütle 0.1871 Hz frekansındaki ters rezonansı 0.17 Hz frekansına kaydırdığı anlaşılmaktadır.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, bir sistemin noktasal veya çapraz FTF'lerinde ters rezonans frekanslarının kütle değişikliği ile istenilen değerlere kaydırılması amaçlanmıştır. Bu sayede belirlenen frekansta yapı üzerinde belirlenen konumda titreşim hareketinin oluşmaması sağlanmaktadır. Bunu sağlayacak gerekli kütle değişikliğinin hesabı için Sherman-Morrison (SM) formülüne dayalı olarak bir yöntem sunulmuştur. Burada tek bir frekans durumu için kesin sonuç veren bir denklem elde edilmiştir. Benzer denklemler başka çalışmalarda da elde edilmesine karşın bu çalışmada SM formülü kullanılarak ilgili denklemler elde edilmiştir. Yöntemin geçerliliği altı serbestlik dereceli bir kütle-yay sistemi için yapılan çeşitli uygulamalarla gösterilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Genel olarak bir sisteme kütle eklendiğinde doğal frekanslar ve ters rezonans frekansları azalma eğilimi gösterirler. Ancak seçilen bazı değişiklik koordinatlarında bazı modların etkilenmediği görülmüştür. Yapılan incelemede bu koordinatların ilgili modun düğüm noktasına karşılık geldiği görülmüştür. Kaydırılacak frekans ilk sistemin doğal frekanslarından biri olarak da seçilebilmektedir. Bu durumda bu frekanstaki rezonans durumu ortadan kaldırılabilmektedir. Yöntem ölçülen FTF'lerin kullanımına dayalı olup sistemin fiziksel veya modal özelliklerine ihtiyaç duymamaktadır. Bu bakımdan yöntem pratik değere sahip olup gerçek sistemler için oldukça elverişlidir.

#### 5. Kaynaklar

- Özgüven H. N. (1990). Structural Modifications Using Frequency Response Functions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **4(1)**:53-63.
- Bucher I. and Braun S. (1993). The Structural modification inverse problem: An exact solution. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **7(3)**: 217-238.
- Sivan D.D. and Ram Y. M. (1996). Mass and Stiffness Modifications to Achieve Desired Natural Frequencies. *Comm. in Numerical Methods in Engineering*, **12**: 531-542.
- Chang K.J., and Park Y.P. (1998). Substructural Dynamic Modification using Component Receptance Sensitivity. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **12**: 525-541.
- Tao L. and Jimin H. (1999). Local structural modification using mass and stiffness changes. *Engineering Structures*, **21(11)**:1028-1037.
- Park Y.H., and Park Y.S. (2000). Structural Modification Based on Measured Frequency Response Functions: An Exact Eigenproperties Reallocation. *Journal of Sound and Vibration*, **237(3)**: 411-426.
- Ram Y.M. (2000). Dynamic Structural Modification. *The Shock and Vibration Digest*, **32(1)**: 11-17.
- Braun S. G., and Ram Y. M. (2001). Modal Modification of Vibrating Systems: Some Problems and Their Solutions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **15(1)**:101-119.
- Tsuei Y. G. and Yee E. K. L.(1989). A method for modifying dynamic properties of undamped mechanical systems. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, **111**:403-408.
- Ram Y.M. (1994). Enlarging a spectral gap by structural modification. *Journal of Sound and Vibration*, **176(2)**:225-234.
- McMillan J., and Keane A. J. (1996). Shifting resonances from a frequency band by applying concentrated masses to a thin rectangular plate. *Journal of Sound and Vibration*, **192 (2)**:549-562.
- Kyprianou A., Mottershead JE. and Ouyang H. (2004). Assignment of natural frequencies by an added mass and one or more springs. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **18**:263-289.
- Farahani K. and Bahai H. (2004). An inverse strategy for relocation of eigenfrequencies in structural design. Part I: first order approximate solutions. *Journal of Sound and Vibration*, **274**:481-505.
- Lawther R. (2007). Assessing how changes to a structure can create gaps in the natural frequency spectrum. *International Journal of Solids and Structures*, **44**:614-635.
- Ouyang H., Richiedei D., Trevisani A. and Zanardo G. (2012). Eigenstructure assignment in undamped vibrating systems: a convex-constrained modification method based on receptances. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **27(2)**:397-409.
- Ouyang H., Richiedei D., Trevisani A. and Zanardo G. (2012). Discrete mass and stiffness modifications for the inverse eigenstructure assignment in vibrating systems: Theory and experimental validation. *International Journal of Mechanical Sciences*, **64**: 211-220.
- Ouyang H. and Zhang J. (2015). Passive modifications for partial assignment of natural frequencies of mass-spring systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*. **50-51**:214-226.

18. Liu Z., Li W., Ouyang H. and Wang D. (2015). Eigenstructure assignment in vibrating systems based on receptances. *Archive of Applied Mechanics*, **85**:713-724.
19. Çakar, O. (2017). Bir sistemin doğal frekanslarının kütle eklenerek kaydırılması üzerine bir çalışma. *18.Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu-UMTS2017, (5-7 Temmuz 2017) Bildirileri, M. İtik (Editör), Trabzon*, 381-386.
20. Mottershead J. E. (1999). On the zeros of structural frequency response functions and their sensitivities, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **12**(5): 591-597.
21. Mottershead J. E. and Lallement G. (1999). Vibration Nodes, and the Cancellation of Poles and Zeros by Unit-Rank Modifications to Structures. *Journal of Sound and Vibration*, **222**(5):833-851.
22. Mottershead J. E. (2001). Structural Modification for the Assignment of Zeros Using Measured Receptances. *ASME Journal of Applied Mechanics*, **68**: 791-798.
23. Mottershead J. E., Mares C., and Friswell M. I. (2001). An inverse method for the assignment of vibration nodes. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **15**(1):87-100.
24. Prells, U., Mottershead, J.E. and Friswell, M.I. (2003). On Pole-Zero Placement By Unit-Rank Modification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **17**(3): 611-633.
25. Sherman J. and Morrison W.J. (1950). Adjustment of an Inverse Matrix Corresponding to a Change in one Element of a Given Matrix. *Annals of Mathematical Statistics*, **21**(1):124-127.
26. Akgün M.A., Garcelon J.H., and Haftka R.T. (2001). Fast Exact Linear and Non-Linear Structural Reanalysis and the Sherman-Morrison-Woodbury Formulas. *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, **50**: 1587-1606.
27. Çakar O. (2011). Mass and stiffness modifications without changing any specified natural frequency of a structure. *Journal of Vibration and Control*, **17**(5):769-776.
28. Sanliturk K.Y. (2002). An Efficient Method for Linear and Nonlinear Structural Modifications. *Proceedings of ESDA 2002: 6th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, ESDA 2002/APM-028, (8-11, July 2002), Istanbul, Turkey.

## Nitratin Çeşitli Topraklardaki Adsorpsiyon Hızlarının İncelenmesi

Cevdet AKOSMAN\*, Tuba ÖZDEMİR

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü, 23119 ELAZIĞ

\*cakosman@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 19.02.2018; Kabul/Accepted: 08.06.2018)

### Özet

Bu çalışmada nitratin çeşitli topraklardaki (kumlu, kireçli ve killi) adsorpsiyon hızları kesikli sistemde incelenmiştir. Kesikli sistem deneysel çalışmaları ortalama 1 mm boyutunda toprak örnekleriyle 25-500 mg/L konsantrasyon değerleri aralığında değişen başlangıç nitrat çözeltileri, farklı sıcaklık değerleri (15, 25, 35 ve 45 °C) kullanılarak yürütülmüştür. Adsorpsiyon hız değerlerinin başlangıç nitrat konsantrasyonu artışıyla arttığı belirlenmiştir. Sıcaklık artışıyla ise adsorpsiyon hız değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Adsorpsiyon hız kinetiğinin belirlenmesinde pseudo birinci derece ve ikinci derece hız ifadeleri kullanılmış ve üç toprak örneği için de nitrat adsorpsiyonunun ikinci dereceden hız denklemi ile daha iyi temsil edildiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Nitrat, Toprak, Adsorpsiyon, Adsorpsiyon Hızı, Adsorpsiyon Kinetiği

### Investigation of Nitrate Adsorption Rates in Various Soils

#### Abstract

In this study, adsorption rates of nitrate in various soils (sandy, calcareous and clay) were investigated in the batch system. The experimental studies were carried out with soil samples with average size of 1 mm soil samples, initial nitrate solutions varying in concentration range 25-500 mg/L and different temperature values (15, 25, 35 and 45 °C). It was determined that adsorption rate values increased with increasing initial nitrate concentration. As the temperature increased, the adsorption rate values decreased. The pseudo first order and pseudo second order kinetic models were applied to the adsorption of nitrate on sand, loam and clay samples. The adsorption processes between nitrate and soils used were found to obey pseudo second order kinetic model.

**Key Words:** Nitrate, Soil, Adsorption, Adsorption Rate, Adsorption Kinetics

#### 1. Giriş

Su kirliliği günümüzde karşılaşılan en önemli çevre kirliliklerinden birini oluşturmaktadır. Su kirliliğinin azaltılmasının ve su kaynaklarının korunmasının sağlanabilmesi için su kirlleticilerinin kaynaklarının, yayılma mekanizmalarının ve etkilerinin bilinmesi gerekmektedir.

Yüzey ve yeraltı sularının kirlenmesine yol açan tarımsal faaliyetler; tarımsal ilaçlamalar, gübre ve hayvansal atıkların doğrudan toprağa atılmasıdır. Bu maddeler, su ile toprakta yüzeye yakın bölgelere kolaylıkla taşınabilmekte ve önemli ölçüde kirliliğe sebep olmaktadır. Yüzey ve yeraltı sularında kirliliğe neden olan parametrelerin başında sulardaki çözünmüş azot gelmektedir. Çözünmüş azotun yeraltındaki en sık rastlanan formu nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) olmakla birlikte,

amonyum ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ), azot oksit ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ve organik azot şeklinde de bulunabilmektedir. Aerobik ortamlarda bulunan bakteriler amonyağı nitrit veya nitrat iyonu haline dönüştürürler. Nitrit iyonu ise oksijen gibi yükseltgen maddeler bulunan ortamlarda kararsız olup hemen yükseltgenerek nitrat iyonu haline dönüşür. İçme sularında fazla miktarlarda bulunan nitrat insan sağlığını büyük oranda etkiler. Yüksek nitrat seviyesinin bebeklerde mavi bebek sendromu denilen hastalığa, yetişkinlerde ise bazı kanser türlerinin ortaya çıkmasına neden olduğu yapılan araştırmalar sonucu ortaya çıkmıştır [1-3]. Sulardaki nitrat kirliliğinin başlıca kaynakları şunlardır: (1) topraktaki organik maddelerin biyolojik olarak parçalanması, (2) tarımsal ilaç ve gübre kullanımı (3) evsel ve endüstriyel atık sular. Toprakta oluşan nitratin bitkiler tarafından tamamen

tüketilmemesi durumunda kalan nitrat yağmur suları ile toprakta taşınarak hem yeryüzü ve hem de yeraltı sularını kirletmektedir. Diğer taraftan gerektiğinden fazla gübre kullanımı da toprağa dolayısıyla suya nitrat geçmesine sebep olmaktadır. Genellikle toprağa atılan azotun %50-70'nin bitkiler tarafından kullanıldığı, % 2-20'sinin buharlaşma yoluyla havaya geçtiği, %15-25'nin ise kil ve toprakta bulunan organik maddelerle birleştiği ve geriye kalan %2-10'luk kısmının yüzey ve yeraltı sularına karıştığı bilinmektedir [4-8]. Ancak toprakta biriken nitratın suya geçişini etkileyen pek çok faktör bulunması nedeniyle, bu değerler değişebilmektedir. Topraktaki nitrat yayınmasını etkileyen faktörler başlıca: toprağın yapısı, bitkilerin azot ihtiyacı, topraktaki biyolojik parçalanma prosesinin hızı, sıcaklık, yağmur, gübre kullanım miktarı, toprağın su içeriği vb. olarak sıralanmaktadır [1,4].

Toprağa atılan veya toprakta oluşarak yeraltı sularına taşınması ve buradan da içme sularına karışması sonucu insan sağlığını büyük oranda etkileyen nitrat vb. inorganik kirleticilerin toprak içerisinde yayınmasının ve taşınımının bu kirleticilerin toprak içerisindeki oluşumu ve birikimi üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu yapılan araştırmalar sonucu ortaya konulmuştur [9-14]. Birçok fiziksel faktör inorganik kirleticilerin toprak içerisindeki difüzyon ve taşınımını etkilemektedir. Bu nedenle çevresel faktörlerin, inorganik kirletici ve toprak özellikleri ile adsorpsiyon karakteristiklerinin araştırılması gerekmektedir. Ayrıca nitratın toprak içerisindeki yayınma ve taşınım mekanizmasının aydınlatılması, gübreleme ve sulama gibi işlemlerin daha kontrollü yapılmasına ışık tutacaktır.

Bu çalışmada, nitratın çeşitli topraklardaki adsorpsiyon hız kinetiği araştırılmıştır. Bu amaçla Elazığ çevresinden temin edilen kum, killi ve kireçli topraklara nitratın adsorpsiyon hız kinetiği sıcaklık ve başlangıç nitrat derişiminin fonksiyonu olarak incelenmiştir.

## 2. Adsorpsiyon Hız Eşitlikleri

Bir kesikli adsorpsiyon prosesinde adsorpsiyon hızı aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir:

$$r_{ad} = \frac{dq}{dt} = \frac{1}{X_o} \cdot \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

Burada;

$r_{ad}$ : Adsorpsiyon hızı (mg adsorplanan kirletici/g adsorbent-dak)

t: Zaman ( dak)

$X_o$ : Adsorbentin çözeltideki derişimi (g adsorbent/L çözelti)

C: Adsorplanan bileşenin herhangi bir t anında çözeltideki konsantrasyonu (mg/L) ,

q: Herhangi bir t anında birim adsorbent kütlesi tarafından adsorplanan miktar (mg/g adsorbent) olup aşağıdaki eşitlik yardımıyla bulunur.

$$q = \frac{C_o - C}{X_o} \quad (2)$$

Burada  $C_o$  adsorplanan bileşenin başlangıç konsantrasyonu (mg/L)' dur.

Diğer taraftan q değerlerinin zamanla değişimi verileri yardımıyla çizilen grafikten, t=0 anında çizilen teğetin eğiminden ilk adsorpsiyon hızı belirlenir.

$$r_{ad} \Big|_0 = \frac{dq}{dt} \Big|_{t=0} \quad (3)$$

Sulu çözeltilerden adsorpsiyon mekanizmasının ortaya konulması ve kütle transferi ve adsorpsiyon hızı prosesi gibi potansiyel hız kontrol basamaklarının belirlenmesi için deneysel verilere uygulanan birçok kinetik ifade geliştirilmiştir. Bunlardan en fazla kullanılan ifadeler aşağıda verilmiştir.

### 2.1. Pseudo 1. mertebe adsorpsiyon hız eşitlikleri

Lagergren tarafından türetilen ve katı-sıvı faz sistemlerde gerçekleştirilen adsorpsiyon proseslerinde katı faz konsantrasyonuna dayandırılan pseudo 1. mertebeden adsorpsiyon hız ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:



$$\frac{dq}{dt} = k_{1,ad} (q_{den} - q) \quad (4)$$

Bu eşitliğin,  $t=0$  için,  $q=0$  ve  $t=t$  için,  $q=q$  sınır şartlarında integrali alınrsa,

$$\ln\left(\frac{q_{den}}{q_{den} - q}\right) = k_{1,ad} t \quad (5)$$

eşitliği elde edilir. Burada;

$q_{den}$ : Adsorplanan bileşenin dengedeki miktarı (mg/g),  $k_{1,ad}$  : Pseudo birinci mertebeden adsorpsiyon hız sabiti (L/dak.)

(5) eşitliği yeniden düzenlenerek aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\ln(q_{den} - q) = \ln(q_{den,h}) - k_{1,ad} t \quad (6)$$

Burada  $q_{den,h}$  hesaplama yoluyla bulunan  $q_{den}$  değeridir. (6) eşitliği kullanılarak birinci mertebeden hız sabitleri,  $\log(q_{den}-q)$  değerleri zamana karşı grafiğe geçirilerek hesaplanır. Çizilen doğrunun eğimi  $-k_{1,ad} / 2,303$ 'e, kayma noktası ise  $\log(q_{den,h})$ 'e eşittir.

## 2.2. Pseudo II. mertebe adsorpsiyon hızı eşitlikleri

Eğer adsorpsiyon hızı ikinci mertebendense, pseudo ikinci mertebeden kinetik hız ifadesi,

$$\frac{dq}{dt} = k_{2,ad} (q_{den} - q)^2 \quad (7)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $k_{2,ad}$  Pseudo ikinci mertebeden hız sabiti (g/mg-dak.)' dir.

(7) eşitliği,

$$\frac{dq}{(q_{den} - q)^2} = k_{2,ad} dt \quad (8)$$

olarak yazılabilir. Pseudo birinci mertebeden hız ifadesinin integrali alındığında aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\frac{1}{(q_{den} - q)} = \frac{1}{q_{den}} + k_{2,ad} t \quad (9)$$

(9) eşitliğindeki  $q$  için,

$$q = \frac{t}{\frac{1}{k_{2,ad} q_{den}^2} + \frac{t}{q_{den}}} \quad (10)$$

ifadesi elde edilir. (10) eşitliği yeniden düzenlenerek aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_{2,ad} q_{den}^2} + \frac{1}{q_{den}} t \quad (11)$$

İkinci mertebeden adsorpsiyon hız sabitini tayin etmek için, (11) eşitliğinden yararlanılarak,  $t/q$  değerleri zamana karşı grafiğe geçirilmiştir. Bu grafikten çizilen doğrunun eğimi  $1/q_{den}$ 'i, y eksenini, kesim noktası  $1/(k_{2,ad}.q_{den}^2)$ 'i verir [15-17].

## 3. Materyal ve Metot

### 3.1. Materyal

Adsorpsiyon hızı çalışmaları için kil bünyeli toprak Elazığ ili çevresinden temin edildi. Bütün toprak örnekleri açık havada 2-3 gün bekletilerek kurumaları sağlandı. Toprak örnekleri eleme işlemine tabi tutularak ortalama 1 mm tanecik boyutundaki fraksiyon deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere plastik kaplarda saklandı. Toprakların pH'sı potansiyometrik yöntemle tayin edilmiştir. Toplam organik madde modifiye Walkley-Black yöntemiyle, toplam azot Kjeldahl yöntemi ve kimyasal bileşimler Perkin Elmer Optima 2000 ICP cihazı ve alev fotometre ve magnezyum EDTA (versanat) titrasyon metodu ile kation değişim kapasiteleri sodyum asetat metodu ile belirlenmiştir. Yoğunluk, toplam gözeneklilik hacmi, spesifik yüzey alanı ve ortalama gözenek çapları F.Ü Kimya Mühendisliği Bölümünde Micromeritics ASAP 2020 yüzey alanı ve Porozimetri cihazında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan toprakların kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Deneysel çalışmalarda kullanılan toprakların bazı özellikleri: (a) kimyasal (b) fiziksel

Toprak Cinsi	Kimyasal Bileşim, %								O.G %	T.A. %	İ.(mmhos/cm)	K.D.K (me/100 g)
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	K.K.				
<b>Kum</b>	68.57	9.97	5.96	4.85	0.0017	0.0019	3.77	6.87	0.193	0.02	0.18	6.48
<b>Kireçli</b>	31.53	8.52	4.28	30.84	0.0018	0.0034	3.45	21.37	0.989	0.06	0.37	30.13
<b>Killi</b>	73.04	12.14	3.53	1.25	0.0069	0.0081	5.78	4.25	0.844	0.07	0.31	57.10

O.G.: organik madde, T.A.: Toplam azot, K.D.K.: Katyon değişim kapasitesi, K.K.: Kızdırma kaybı, İ.: İletkenlik

	Yığın yoğunluğu, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	Yüzey alanı, S <sub>g</sub> , m <sup>2</sup> /g	Toplam gözenek hacmi, cm <sup>3</sup> /g	Ortalama gözenek çapı, d, $\mu$ m
<b>Kum</b>	1.47	4.08	0.0077	0.0076
<b>Kireçli toprak</b>	0.92	14.80	0.0286	0.0078
<b>Killi toprak</b>	0.88	70.34	0.0847	0.0048

### 3.2. Deneysel yöntem ve deneylerin yapılışı

Adsorpsiyon çalışmaları kesikli düzende çalışan adsorpsiyon kaplarında yürütülmüştür. Kesikli sistemde başlangıç konsantrasyonu tayin edilmiş belirli hacimdeki çözelti ortamına belli miktarda adsorbant ilavesiyle adsorpsiyon işlemi gerçekleştirilir. Sabit karıştırma hızında belirli bir çalkalama süresi sonunda çözelti analiz edilerek adsorplanmayan miktar tayin edilir.

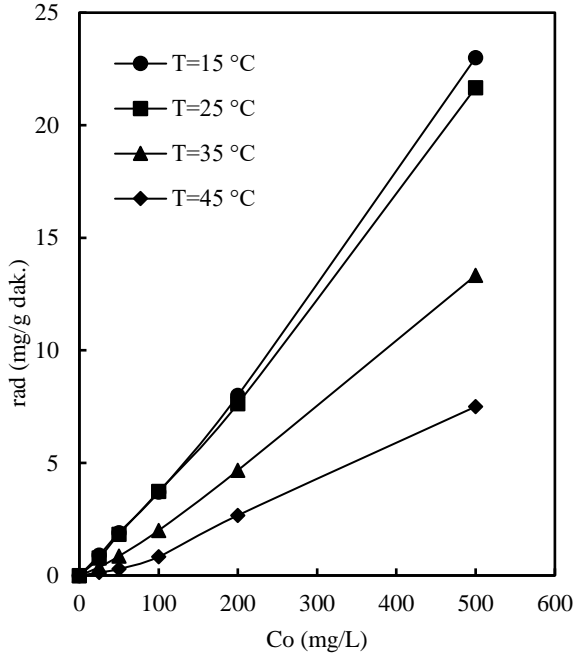
Bu amaçla adsorpsiyon kabı olarak 150 mL'lik erlenler kullanılmıştır. Çalkalama işlemi için sabit karıştırma hızı ve sabit sıcaklığın sağlandığı bir hava ısıtmalı çalkalayıcı kullanılmıştır. Adsorpsiyon işleminin tamamlanmasından sonra çözeltiler Schleicher&Schuell marka 589/3 nolu ( $\phi=125$  mm) süzgeç kağıdı yardımıyla süzülerek analize hazırlanmıştır.

Adsorpsiyon çalışmaları farklı konsantrasyonlarda nitrat içeren 50 mL'lik çözeltilere 5 g toprak örneği ilave edilerek gerçekleştirilmiştir. Erlenlerin ağzları adsorpsiyon çözeltilerinin buharlaşmasını engellemek amacıyla plastik kapaklarla sıkı bir şekilde kapatılarak çalkalayıcıya konulmuştur. Daha sonra değişik sürelerde yürütülen çalkalama işlemi sonunda çözeltiler süzme işlemine tabi tutularak toprak örnekleri üzerine adsorplanan nitrat miktarları belirlemek üzere analiz edilmiştir. Adsorpsiyon ortamında adsorplanmayan nitrat derişimi mg/L cinsinden spektrofotometrik olarak tayin edilmiştir. Bu amaçla J. P. Selecta marka 2005 model UV Spektrofotometre kullanılmıştır.

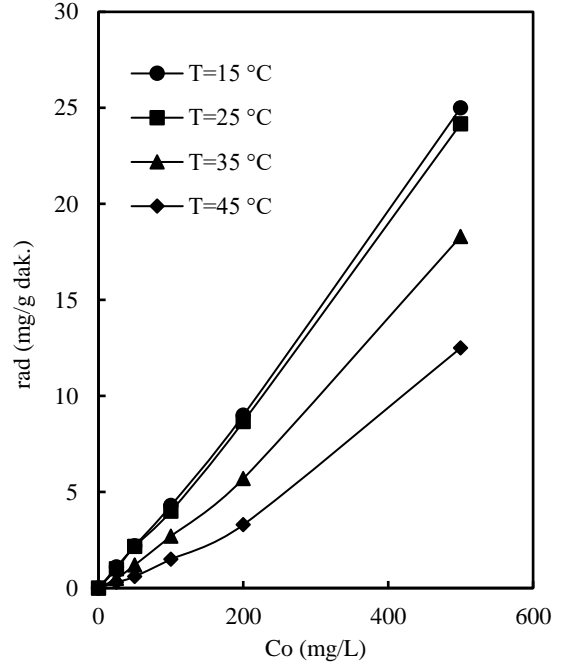
Çalışmada 25-500 mg/L aralığında değişen konsantrasyon değerlerine sahip nitrat çözeltileri kullanılarak 15-45 °C aralığında farklı sıcaklıklarda ve ortalama 1 mm boyutlara sahip toprak örnekleri için 100 rpm sabit çalkalama hızında deneyler yürütülmüştür.

### 4. Bulgular ve Tartışma

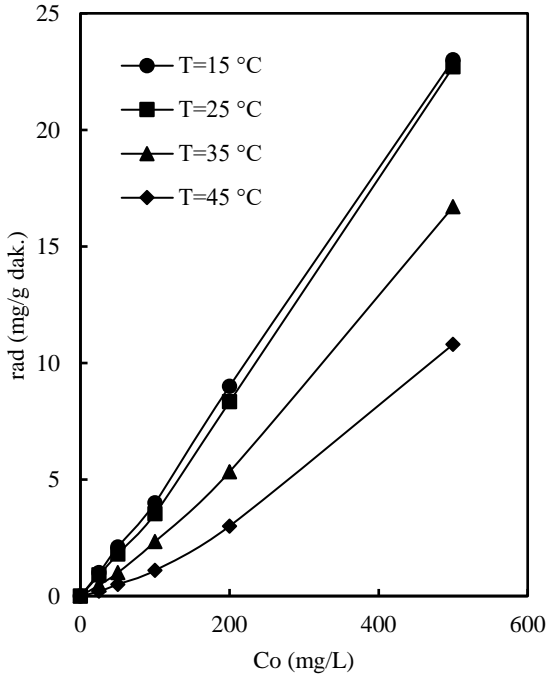
Nitratın toprak içerisindeki adsorpsiyon kinetiğinin bilinmesi adsorpsiyon derecesinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olur. Bu amaçla nitratın kum, kireçli toprak ve killi topraktaki adsorpsiyon kinetiği incelenmiştir. Şekil 1-3'de çalışılan toprak örneklerindeki nitratın ilk adsorpsiyon hızı ile başlangıç konsantrasyonu arasındaki ilişki görülmektedir. Şekil 1-3'den de görüldüğü gibi bütün toprak örnekleri için nitrat ilk adsorpsiyon hızı başlangıç konsantrasyonu atışıyla artmaktadır. Bu artışın killi toprak için daha fazla olduğu görülmektedir. Başlangıç nitrat konsantrasyonunun artmasıyla katı ve sıvı arasındaki konsantrasyon farkı olan sürücü güç ( $\Delta C$ ) artmakta ve dolayısıyla nitratın toprak örnekleri üzerine adsorpsiyon hızı artış göstermektedir. Bununla birlikte toprak örneklerindeki ilk adsorpsiyon hızları sıcaklık artışıyla azalmaktadır. Diğer taraftan çalışılan bütün başlangıç nitrat konsantrasyon değerleri için nitratın toprak üzerine adsorpsiyonunda adsorpsiyon hızı üzerine literatürde benzer sonuçlar elde edilmiştir [18-20].



Şekil 1. Kum örnekleri üzerine nitrat adsorpsiyonunda rad ile Co arasındaki ilişki



Şekil 3. Killi toprak örnekleri üzerine nitrat adsorpsiyonunda rad ile Co arasındaki ilişki

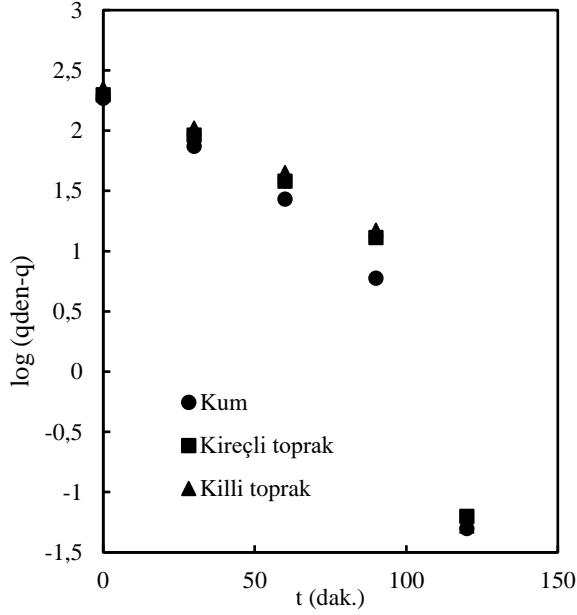


Şekil 2. Kireçli toprak örnekleri üzerine nitrat adsorpsiyonunda rad ile Co arasındaki ilişki

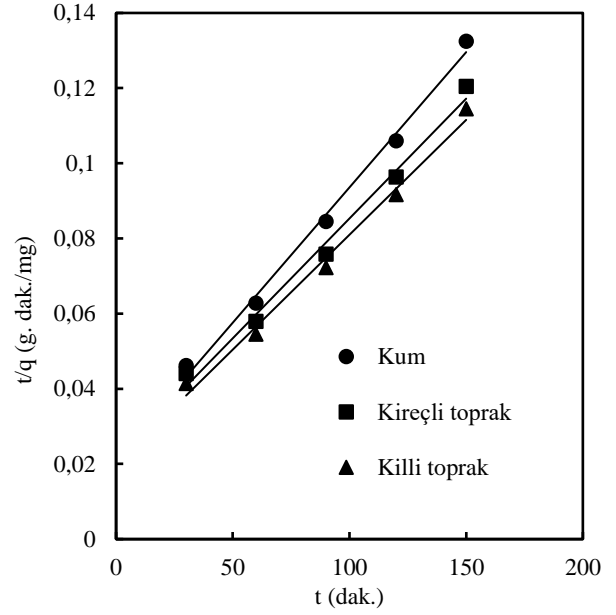
Nitratın kum, killi toprak ve kireçli toprak üzerine adsorpsiyon hızı için, öncelikle Eşitlik 6 yardımıyla  $t$  değerlerine karşı  $\ln(q_{den}-q)$  değerleri grafiğe geçirilerek pseudo birinci dereceden adsorpsiyon hız ifadesine uygunluğu araştırılmıştır.

Şekil 4'de 25 °C sıcaklık ve 100 ppm nitrat başlangıç konsantrasyonu için kum, kireçli toprak ve killi toprak için pseudo birinci dereceden adsorpsiyon hızlarının lineer formu görülmektedir. Bu grafikten anlaşıldığı üzere pseudo birinci dereceden adsorpsiyon hız ifadesinin lineer formunun deneysel değerlerle uygunluk derecesi fazla yüksek görülmemektedir. Benzer durum çalışılan diğer sıcaklık ve nitrat başlangıç konsantrasyonu değerleri için de gözlenmiştir. Pseudo ikinci dereceden adsorpsiyon hızının deneysel verilere uygunluğu ise Eşitlik 11 kullanılarak çizilen grafiklerle test edilmiştir. Şekil 5'de 25 °C sıcaklık ve 100 ppm nitrat başlangıç konsantrasyonu için kum, kireçli toprak ve killi toprak için pseudo ikinci dereceden adsorpsiyon hız grafiği görülmektedir. Bu grafiklerden anlaşıldığı üzere pseudo ikinci dereceden adsorpsiyon hız ifadesinin lineer formunun deneysel değerlerle uygunluk derecesinin yüksek olduğu görülmektedir. Benzer durum çalışılan diğer sıcaklık ve nitrat başlangıç konsantrasyonu değerleri için de gözlenmiştir.

Nitratın kum, killi toprak ve kireçli toprak üzerine adsorpsiyonunda, Eşitlik 5 yardımıyla pseudo birinci dereceden adsorpsiyon hız sabiti ( $k_{1,ad}$ ), korelasyon katsayıları ve  $q_{den,h}$  değerleri bulunmuştur.  $t$  değerlerine karşı  $\ln(q_{den}-q)$



**Şekil 4.** Toprak örnekleri ile nitrat adsorpsiyonuna ilişkin Pseudo 1. Dereceden Kinetik Model (T=25 °C, C<sub>0</sub>=100 mg/L)



**Şekil 5.** Toprak örnekleri ile nitrat adsorpsiyonuna ilişkin Pseudo 2. Dereceden Kinetik Model (T=25 °C, C<sub>0</sub>=100 mg/L)

değerlerinden elde edilen doğrularının eğim ve kaymasından hız sabiti ( $k_{1,ad}$ ) ve  $q_{den,h}$  değerleri hesaplanmıştır. Eşitlik 11 yardımıyla çizilen doğrularının eğim ve kaymasından ise hız sabiti ( $k_{2,ad}$ ) ve  $q_{den,h}$  değerleri bulunmuştur. Tablo 3-45'de 25-500 mg/L arasında değişen başlangıç nitrat konsantrasyonu ile 15 °C, 25 °C, 30 °C ve 45 °C sıcaklıklarında sırasıyla kum, kireçli ve killi toprak örnekleri için ( $k_{1,ad}$ ), ( $k_{2,ad}$ ), deneysel  $q_{den}$  ve teorik  $q_{den,h}$  değerleri ile korelasyon katsayıları verilmiştir. Tablolardan da görüldüğü üzere deneysel veriler çoğunlukla pseudo ikinci dereceden hız ifadesine, pseudo birinci dereceden hız ifadesine göre daha büyük uyumluluk göstermiştir ve oldukça yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Ancak 45 °C'de kum örneklerinde 25, 50 ve 100 ppm değerlerinde kireçli toprak örneklerinde ise 25, 50 ppm değerlerinde ikinci dereceden hız ifadesine ait korelasyon katsayıları birinci dereceden hız ifadesine ait korelasyon katsayılarına göre oldukça düşüktür. Bunun nedenin adsorpsiyon prosesi ekzotermik olduğundan 45 °C'de nitratın düşük başlangıç konsantrasyonlarında sulu çözelti ile katı arasındaki kütle transfer direnci etkisini ortadan kaldırmada etkili olamadığı söylenebilir. İdeal şartlarda deneysel olarak bulunan  $q_{den}$  değerlerinin, teorik olarak hesaplanan  $q_{den,h}$  değerlerine pseudo ikinci

dereceden hız modelinde daha yakın olduğu görülmektedir. Literatürde nitratın çeşitli topraklardaki adsorpsiyonu için adsorpsiyon dengesi üzerine bazı çalışmalar bulunmasına karşın adsorpsiyon hız kinetiğine ait verilere rastlanmamıştır.

## 5. Sonuçlar

Toprak-su ortamında nitratın taşınım ve adsorpsiyon davranışını anlamak, topraklardaki azot dengesi bilgisi için gereklidir. Diğer taraftan günümüzde tarım alanlarında azotlu gübrelerin uygulanmasının etkinliğini arttırmak için topraklarda nitrat taşınması ve adsorpsiyonunun belirlenmesi çok önemli bir konu haline gelmiştir. Bu araştırmada, nitratın kumla karşılaştırıldığında, kireçli ve killi topraklarda daha fazla adsorplandığı gözlenmiştir. Bu nedenle, toprak ortamındaki çözülmüş nitratın daha yüksek kil, kireç ve organik madde içeriğine sahip topraklara kıyasla kum ve düşük organik madde içeriğine sahip topraklarda ve topraklarda yeraltı sularına daha hızlı ulaşacağı kaçınılmazdır. Adsorpsiyon kinetiğinin belirlenmesinde pseudo birinci derece ve pseudo ikinci derece hız ifadeleri kullanılmış ve üç toprak örneği için de nitrat adsorpsiyonunun pseudo

**Tablo.2** Kum örnekleri için Pseudo 1. ve 2. derece hız sabitleri ile deneysel ve hesaplanan nitrat denge konsantrasyon değerleri

Sıcaklık (°C)	C <sub>o</sub> (ppm)	q <sub>den</sub> (mg/g)	k <sub>1,ad</sub> x10 <sup>2</sup> (L/dak)	q <sub>den,h</sub> (mg/g)	R <sup>2</sup>	k <sub>2,ad</sub> x10 <sup>4</sup> (g/mg.dak.)	q <sub>den,h</sub> (mg/g)	R <sup>2</sup>
15	25	0.038	4.95	0.066	0.8512	8.54	0.045	0.9957
	50	0.091	3.96	0.126	0.9027	2.96	0.111	0.9966
	100	0.199	4.31	0.356	0.8162	0.86	0.263	0.9926
	200	0.425	5.0	0.796	0.8175	0.57	0.526	0.9867
	500	1.249	5.20	3.095	0.7536	0.07	2.000	0.9756
25	25	0.040	5.30	0.072	0.9203	7.26	0.049	0.9907
	50	0.087	5.64	0.174	0.8537	4.23	0.102	0.9973
	100	0.186	6.33	0.452	0.8588	1.75	0.222	0.9938
	200	0.412	6.75	1.275	0.7957	0.56	0.526	0.9916
	500	1.132	7.35	4.119	0.7553	0.23	1.429	0.9939
35	25	0.027	6.75	0.083	0.8539	4.29	0.039	0.9205
	50	0.061	5.41	0.151	0.8156	1.69	0.091	0.9632
	100	0.131	6.08	0.361	0.8342	1.03	0.185	0.9665
	200	0.300	6.03	0.868	0.7937	0.45	0.417	0.9788
	500	0.851	5.76	2.117	0.8489	0.19	1.111	0.9721
45	25	0.018	5.94	0.054	0.8436	0.24	0.086	0.1063
	50	0.043	5.18	0.122	0.7883	0.02	0.435	0.0287
	100	0.096	5.87	0.299	0.8099	0.16	0.270	0.4363
	200	0.231	6.29	0.804	0.7550	0.23	0.417	0.8681
	500	0.675	5.62	1.841	0.8319	0.07	1.250	0.8098

**Tablo.3.** Kireçli toprak örnekleri için Pseudo 1. ve 2. derece hız sabitleri ile deneysel ve hesaplanan nitrat denge konsantrasyon değerleri

Sıcaklık (°C)	C <sub>o</sub> (ppm)	q <sub>den</sub> (mg/g)	k <sub>1,ad</sub> x10 <sup>2</sup> (L/dak)	q <sub>den,h</sub> (mg/g)	R <sup>2</sup>	k <sub>2,ad</sub> x10 <sup>4</sup> (g/mg.dak.)	q <sub>den,h</sub> (mg/g)	R <sup>2</sup>
15	25	0.046	5.18	0.097	0.8382	4.56	0.059	0.9930
	50	0.103	3.94	0.160	0.8335	2.02	0.130	0.9939
	100	0.219	3.71	0.325	0.8448	0.79	0.286	0.9922
	200	0.459	4.58	0.818	0.8372	0.44	0.588	0.9903
	500	1.373	4.63	2.808	0.7795	0.09	2.000	0.9896
25	25	0.044	5.48	0.078	0.9398	8.01	0.052	0.9936
	50	0.094	5.69	0.187	0.8576	4.18	0.109	0.9975
	100	0.198	6.17	0.549	0.7927	1.03	0.256	0.9916
	200	0.444	4.88	0.789	0.9056	0.54	0.556	0.9931
	500	1.245	7.51	4.811	0.7686	0.17	1.667	0.9897
35	25	0.031	4.97	0.065	0.8554	4.16	0.043	0.9794
	50	0.071	5.07	0.154	0.8506	1.65	0.103	0.9625
	100	0.143	6.15	0.387	0.8391	1.17	0.192	0.9773
	200	0.330	6.13	0.964	0.7970	0.44	0.455	0.9826
	500	0.950	6.86	3.222	0.7821	0.20	1.250	0.9886
45	25	0.022	5.83	0.073	0.7655	0.53	0.069	0.4380
	50	0.054	5.34	0.149	0.7985	0.26	0.156	0.4193
	100	0.108	5.96	0.333	0.8181	0.28	0.238	0.6580
	200	0.260	4.88	0.605	0.8402	0.19	0.476	0.8742
	500	0.775	5.64	2.060	0.8208	0.11	1.250	0.9554

**Tablo.4.** Killi toprak örnekleri için Pseudo 1. ve 2. derece hız sabitleri ile deneysel ve hesaplanan nitrat denge konsantrasyon değerleri

Sıcaklık (°C)	C <sub>o</sub> (ppm)	q <sub>den</sub> (mg/g)	k <sub>1,ad</sub> x10 <sup>2</sup> (L/dak)	q <sub>den,h</sub> (mg/g)	R <sup>2</sup>	k <sub>2,ad</sub> x10 <sup>4</sup> (g/mg.dak.)	q <sub>den,h</sub> (mg/g)	R <sup>2</sup>
15	25	0.048	5.23	0.086	0.8754	6.98	0.057	0.9948
	50	0.110	3.87	0.176	0.7820	1.71	0.141	0.9799
	100	0.232	4.42	0.408	0.7717	0.79	0.303	0.9736
	200	0.487	5.07	0.970	0.7995	0.42	0.625	0.9819
	500	1.490	3.75	2.410	0.8407	0.09	2.000	0.9879
25	25	0.047	5.30	0.083	0.8987	8.13	0.055	0.9971
	50	0.105	4.68	0.161	0.9135	3.31	0.123	0.9972
	100	0.225	6.26	0.646	0.7856	0.87	0.294	0.9918
	200	0.472	6.84	1.454	0.7941	0.53	0.588	0.9891
	500	1.310	5.99	3.172	0.8374	0.18	1.667	0.9906
35	25	0.033	5.11	0.065	0.8982	5.42	0.044	0.9769
	50	0.076	5.57	0.181	0.8318	2.02	0.104	0.9750
	100	0.160	5.39	0.341	0.9011	1.07	0.213	0.9792
	200	0.360	6.98	1.465	0.7223	0.32	0.526	0.9846
	500	1.031	5.85	2.518	0.8394	0.23	1.250	0.9893
45	25	0.024	5.99	0.072	0.8114	2.72	0.041	0.8737
	50	0.059	5.41	0.156	0.8083	0.68	0.116	0.7624
	100	0.125	6.15	0.383	0.8342	0.49	0.217	0.8697
	200	0.289	4.86	0.703	0.8050	0.15	0.556	0.8965
	500	0.853	5.73	2.242	0.8292	0.13	1.250	0.9632

ikinci dereceden hız denkleminin temsil ettiği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, çeşitli sebeplerle toprağa karışan nitrat iyonları sular tarafından toprak içerisinde taşınırken bir miktar toprak üzerine adsorplanmaktadır. En fazla adsorpsiyon killi toprak üzerinde olmaktadır. Bunu sırasıyla kireçli toprak ve kum takip etmektedir. Böylece Toprağa verilen nitrat iyonlarının büyük bir kısmı toprak içerisinde sular tarafından taşınarak yer altı sularına karışıp kirliliğe neden olabilir.

## 6. Kaynaklar

1. Yetiş, Ü., Dilek, F.B. (1998). Su kaynaklarında kirlenme, Yerel Yönetimler Araştırma ve Eğitim Merkezi Kentsel Hizmetler Dizisi /2: 1-5.
2. Brady, N. C. (1998). Nitrogen and sulfur economy of soils. In *The Nature and Properties of Soils*, 12th ed., eds N. C. Brady and R. R. Weil, pp. 492–522. Elsevier, New York.
3. Haugen, K.S, Semmens, M.J. and Novak, P.J. (2002). A novel in situ technology for the treatment of nitrate contaminated groundwater, *Water Research*, **36**: 3497-506
4. Antonopoulos, V.Z. and Wyseure, G.C.L. (1998). Modeling of water and nitrogen dynamics on an undisturbed soil and restored soil after open-cast mining. *Agricul. Water Manag.*, **37**: 21-40.
5. Hallberg, G.B. (1989). Nitrate in groundwater in the United States. In: Follett RF, editor. Nitrogen management and groundwater protection, developments in agricultural and managed-forest ecology, vol. 21. New York: Elsevier, 35–74.
6. Spalding, R.F., Watts, D.G., Schepers, J.S., Burbach, M.E., Exner, M.E., Poreda, R.J. and Martin, G.E. (2001). Controlling nitrate leaching in irrigated agriculture. *J Environ. Quality*, **30**: 1184-1194.
7. Spruill, T.B., Showers, W.J. and Howe, S.S. (2002). Application of classification-tree methods to identify nitrate sources in ground water. *J Environ. Quality*, **31**: 1538-1549.
8. Lake, I.R., Lovett, A.A., Hiscock, K.M., Betson, M., Foley, A., Sünnerberg, G., Evers, S. and Fletcher, S. (2003). Evaluating factors influencing groundwater vulnerability to nitrate pollution: developing the potential of GIS. *J Environ. Management*, **68**: 315-328.
9. Singh, B.R. and Kanehiro, Y. (1969). Adsorption of nitrate in amorphous and kaolinitic Hawaiian soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **33**: 681-683.
10. Black, A.S. and Waring, S.A. (1976). Nitrate leaching and adsorption in a krasnozem from

- redland bay: effect of nitrate concentration on adsorption and movement in soil columns. *Aust. J. Soil Res.*, **14**:189-195.
11. Black, A.S. and Waring, S.A. (1979). Adsorption of nitrate, chloride and sulfate by some highly weathered soils from South-East Queensland. *Aust. J. Soil Res.*, **17**: 271-282.
  12. Eick, M.J., Brady, W.D. and Lynch, C.L. (1999). Charge properties and nitrate adsorption of some acid Southeastern soils. *J. Environ. Qual.*, **28**: 138-144.
  13. Aksu, Z. and Gülen, H., 2002, Binary biosorption of iron (III) and iron (III)-cyanide complex ions on *Rhizopus arrhizus*: modelling of synergistic interaction, *Process Biochemistry*, **38**: 161-173.
  14. Chu, K. H., 2002, Removal of copper from aqueous solution by chitosan in prawn shell: adsorption equilibrium and kinetics, *Journal of Hazardous Materials B*, **90**: 77-95.
  15. Aksu, Z. and Kabasakal, E., 2004; Batch adsorption of 2,4-dichlorophenoxy-acetic acid (2,4-D) from aqueous solution by granular activated carbon, *Separation and Purification Technology*, **35**: 223-240.
  16. Eid, N., Elshorbagy, W., Larson, D. and Slack, D. (2000). Electro-migration of nitrate in sandy soil. *J Hazard. Mater. B*, **79**: 133-149.
  17. Mikolajkow, J. (2003). Laboratory methods of estimating the retardation factor of migrating mineral nitrogen compounds in shallow groundwater. *Geol. Quarterly*, **47**: 91-96.
  18. Öztürk, N., Bektaş, T. E., 2004, "Nitrate Removal From Aqueous Solution By Adsorption Onto Various Materials", *J. Hazardous Materials*, **112**: 155-162.
  19. Li, K., Torello, W.A. and Xing, B., 2000, "Retention of organic and inorganic chemicals by the drainage/supply piping material", *Environmental Pollution*, **108**: 397-403.
  20. Khan, A.A. and Singh, R.P., 1987, "Adsorption thermodynamics of carbofuran on Sn(IV) arsenosilicate in H<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup> forms", *Journal of Colloidal Sci.*, **24**: 33-42.





## Geliştirilmiş Adaptif Sinüs Kosinüs Algoritması (ASKA)'nın Optimizasyon Problemlerinin Çözümünde Kullanılması

Erkan TANYILDIZI, Gökhan DEMİR

Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Yazılım Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
etanyildizi@gmail.com

(Geliş/Received: 17.08.2017; Kabul/Accepted: 10.03.2018)

### Özet

Bu çalışmada; optimizasyon problemlerinin çözümü için yeni bir popülasyon tabanlı optimizasyon algoritması olan Sinüs Kosinüs Algoritması (SKA)'nın geliştirilmiş yeni bir versiyonu verilmiştir. Matematiksel tabanlı olan SKA, sinüs ve kosinüs fonksiyonları kullanılarak oluşturulmuş matematiksel model ile arama uzayında içe veya dışa doğru hareket ederek arama uzayının keşfini ve sömürülmesini garanti ederek en iyi çözümü bulmaya çalışır. SKA'nın performansını arttırmak için tanımlı olan rast gele değişkenlerin algoritmadaki yeri ve katsayılarının değiştirilmesi ile evrimsel olarak daha uyumlu kılan bir özellik eklenmiştir. Geliştirilmiş yeni optimizasyon algoritması Adaptif Sinüs Kosinüs Algoritması (ASKA) olarak tanımlanır. ASKA'nın performansını değerlendirmek için literatürde yaygın olarak kullanılan kısıtsız kalite testi fonksiyonları üzerinde testler yapılmıştır. Ayrıca kısıtlı problemler üzerindeki etkinliği test etmek için mühendislik tasarım problemlerinden biri olan basınçlı kap probleminin çözümünde kullanılmıştır. Wilcoxon işaretli sıralar testi yapılarak ASKA'nın karşılaştırılan diğer metasezgisel algoritmalara göre performansı incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Adaptif Sinüs Kosinüs Algoritması, Optimizasyon, Metasezgisel Algoritmalar.

## The Use of Improved Adaptive Sine Cosine Algorithm (ASKA) in the Solution of Optimization Problems

### Abstract

In this study; a new version of the Sinus Cosine Algorithm (SKA), a new population-based optimization algorithm for solving optimization problems, is presented. SKA, mathematically based, tries to find the best solution by guaranteeing exploration and exploitation of search space by moving inward or outward in search space with a mathematical model created using sine and cosine functions. A feature that is evolutionarily more compatible with the location and coefficients of the random variables defined in the algorithm to improve the performance of the SKA is added. The new optimized optimization algorithm is called the Adaptive Sine Cosine Algorithm (ASKA). Unrestricted quality testing functions commonly used in the literature have been tested to evaluate the performance of ASKA. It was also used to solve the problem of the pressure vessel, one of the engineering design problems, to test the efficiency on constrained problems. Wilcoxon signed rank tests were performed to evaluate the performance of ASKA relative to other comparative meta-static algorithms.

**Keywords:** Adaptive Sine Cosine Algorithm, Optimization, Metaheuristic Algorithms.

### 1. Giriş

Metasezgisel algoritmalar, gerçek yöntemlerin makul bir hesaplama süresi içinde optimum çözüme erişemeyeceği, özellikle de çok sayıda yerel minimum ile çevrelenen global minimum bulunduğu, gerçek hayat problemlerine yakın optimal çözümler bulma potansiyellerini kanıtlamıştır. Bu nedenden ötürü metasezgisel algoritmalar, gerçek mühendislik problemlerinin global optimumunu bulması için oldukça sık kullanılmaktadır [2]. Gerçek dünya

mühendislik optimizasyonu problemlerinin çoğu çok karmaşıktır ve çözülmesi oldukça zordur.

Mevcut sayısal yöntemlerin basitlik, etkinlik ve doğruluk gibi dezavantajları, araştırmacıları, mühendislik optimizasyon problemlerini çözmek için doğadan veya farklı bilim dallarından ilham alan yöntemlere dayalı metasezgisel algoritmalara güvenmeye teşvik etmektedir.

Mühendislik probleminde birden fazla lokal optimum varsa, başlangıç noktasının seçimine bağlı olarak elde edilen en uygun çözüm global optimum olmayabilir [2]. Genel amaçlı sezgisel

yöntemlerin yaygın olarak kullanılmasındaki başlıca nedenler, lokal optimumdan kaçınma, kod basitliği, gerçekleştirilebilirlik, esneklik, sağlamlık, basitlik, analiz edilebilirlik, ve türetilbilmedir [3].

Metasezgisel algoritmalar, genellikle doğal fenomeni taklit eden kuralları ve rasgeleliği birleştirerek en doğru çözümü bulmaya çalışırlar [4]. Metasezgisel algoritmaların bir diğer avantajı ise, probleme bağımlı olmamasıdır. Bu yüzden kısıtlı veya kısıtsız her türlü problemleri çözmek için kullanılabilen genel amaçlı yöntemlerdir. Buna karşılık sonuçların doğruluğundan minimum hata değeri kadar taviz verilebilir [5]. Genel amaçlı metasezgisel yöntemler genellikle doğadan ilham alınarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca farklı bilim dallarından veya bu bilim dallarının birleşiminden ilham alınarak gerçekleştirilmiş olan biyoloji, fizik, kimya, matematik ve sosyal tabanlı yöntemler mevcuttur. Doğadan ilham alan algoritmaların büyük bölümü biyoloji tabanlıdır. Biyolojik sistemin, doğal seçim süreci, biyolojik canlıların coğrafik dağılımı, yayılım, istila ve insanların yaratıcı bir şekilde problem çözme süreci, sürü zekâsına bağlı olarak besin arama, avlanma, göç ve üreme gibi bazı başarılı özelliklerinden ilham almaktadır. Fizik ve kimya biliminden ilham alınarak geliştirilen algoritmalar, elektrik yükleri, kara delik olgusu, yerçekimi, nehir sistemleri, mükemmel armoni vb. içeren belli fiziksel ve kimyasal kanunları taklit etmişlerdir. Matematik tabanlı metasezgisel yöntemler, matematiksel programlama tekniklerinin kullanılmasıyla geliştirilen sezgisel algoritmalarlardır. Sosyal tabanlı metasezgisel algoritmalar ise insanların sosyal ve rekabetçi davranışlarından ilham alınarak geliştirilmeleridir [1,6].

Literatüre kazandırılmış çok başarılı algoritmalar ve teknikler geliştirilmiş olsa da; bilimsel alanda sürekli iyileşme ve daima daha iyiyi arama felsefesi altında yeni tekniklerin tasarlanması, geliştirilmesi ve uygulanması önemli bir görevdir. Bu amaç doğrultusunda bu çalışmada kapsamında SKA [7] üzerinde iyileştirmeler yapılarak Adaptif Sinüs Kosinüs Algoritması (ASKA) önerilmektedir. Önerilen algoritmanın başarısını test etmek için literatürde yaygın olarak kullanılan kısıtsız yirmi üç kıyaslama fonksiyona ve kısıtlı olan

mühendislik problemlerinden basınçlı kap problemine uygulanmıştır. Ayrıca önerilen algoritmadan elde edilen sonuçlar literatürdeki bazı optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılmıştır.

## 2. Adaptif Sinüs Kosinüs Algoritması (SKA)

Sinüs Kosinüs Algoritması'nda her arama ajanının her boyutu için  $r_2$ ,  $r_3$  ve  $r_4$  parametrelerinin rastgele olarak yeniden belirlenmesi hedefe ulaşmada sapsmalara neden olmaktadır [7]. Ayrıca her boyut bu parametrelerin yeniden belirlenmesi problemlerin çözümünde geçen süreyi artırmaktadır. Bu nedenle önerilen yeni yöntemde  $r_2$ ,  $r_3$  ve  $r_4$  parametrelerinin her arama ajanı için belirlenip tüm boyutları için sabit tutularak hem hedeften sapsmaların azaltılması hem de performansta iyileştirmelerin sağlanması gerçekleştirilmiştir.

Şekil 1'de sözde kodu verilen SKA üzerinde iyileştirmeler yapılarak geliştirilen Adaptif Sinüs Kosinüs Algoritması (ASKA)'nın sözde kodu Şekil 3'de gösterilmektedir.

```

1. Başlangıç popülasyonunu her boyut için arama ajanı sayısı kadar düzgün dağılıma bağlı olarak rastgele oluştur
2. Arama ajanlarının uygunluğunu hesapla
3. En iyi arama ajanını bul ve hedef değer olarak ata
4. while maksimum iterasyon sayısı
5.    $t = 2, c = 2$ 
6.    $r_1 = c - t * (c / \text{Maksimum iterasyon})$ 
7.   for arama ajanı sayısı
8.     for boyut sayısı
9.        $r_2 \leftarrow 2\pi * \text{rand}, r_3 \leftarrow 2 * \text{rand}, r_4 \leftarrow \text{rand}$ 
10.      if  $r_4 < 0$ 
11.         $X(i, j) \leftarrow X(i, j) + (r_1 * \sin(r_2) * |r_3 * P(j) - X(i, j)|)$ 
12.      else
13.         $X(i, j) \leftarrow X(i, j) + (r_1 * \sin(r_2) * |r_3 * P(j) - X(i, j)|)$ 
14.      end if
15.    end for
16.  end for
17. En iyi çözümü (arama ajanı) bul ve P(j)'ye hedef değer olarak ata
18. end while
19. return en iyi çözüm kümesi ve elde edilen global optimum sonuç

```

Şekil 1. Sinüs Kosinüs Algoritması sözde kodu

SKA' da keşif ve sömürü için önerilen pozisyon güncelleme denklemleri Denklem 1' de,

pozisyon üzerindeki etkileri ise Şekil 2 de verilmiştir.

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} x_i^t + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t|, r_4 < 0.5 \\ x_i^t + r_1 \times \cos(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t|, r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

$x_i^t$ :  $i$ . boyutun  $t$ . iterasyonundaki güncel çözümü.

$r_1, r_2, r_3$ : Rastgele sayılar.

$r_4$ :  $[0, 1]$  aralığında rastgele bir sayıdır.

$P_i$ :  $i$ . boyuttaki hedef noktanın pozisyonu.

$||$ : Mutlak değer.

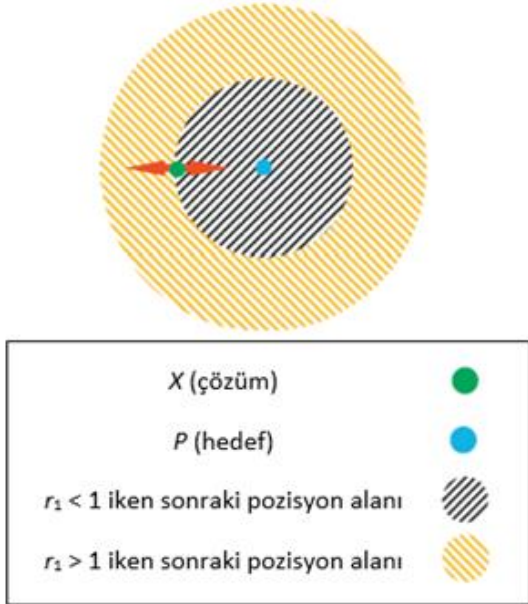
Yukarıdaki denklemlerde görüleceği üzere SKA'da;  $r_1, r_2, r_3, r_4$  olmak üzere 4 ana parametre kullanılır.

$r_1$ : Bir sonraki pozisyon bölgesini (veya hareket yönü) belirler.

$r_2$ : Hedefe ulaşmak için, içe doğru ya da dışa doğru ne kadar hareket edileceğini belirler.

$r_3$ : Stokastik ağırlığı rastgele belirler.  $r_3 > 1$  olması stokastikliğin önemli olduğunu,  $r_3 < 1$  olması ise stokastikliğin daha az etkili olduğunu belirtir.

$r_4$ : Denklemdaki sinüs ve kosinüs bileşenleri arasındaki geçişi sağlar.



Şekil 2. Denklem 1 ve Denklem 2'deki sinüs ve kosinüsün bir sonraki pozisyon üzerindeki etkileri [7]

```

1. Başlangıç popülasyonunu her boyut için arama
   ajanı sayısı kadar düzgün dağılıma bağlı olarak
   rastgele oluştur
2. Arama ajanlarının uygunluğunu hesapla
3. En iyi arama ajanını bul ve hedef değer olarak ata
4. while maksimum iterasyon sayısı
5.   t = 2, c = 2
6.   r1 = c - t* ( c / Maksimum iterasyon)
7.   for arama ajanı sayısı
8.     r2 ← 2π * rand, r3 ← 2 * rand, r4 ← rand
9.     for boyut sayısı
10.      if r4 < 0
11.        X(i, j) ← X(i, j) + (r1 * sin(r2) * |r3 * P(j) - X(i, j)|)
12.      else
13.        X(i, j) ← X(i, j) + (r1 * cos(r2) * |r3 * P(j) - X(i, j)|)
14.      end if
15.    end for
16.  end for
17. En iyi çözümü (arama ajanı) bul ve P(j)'ye hedef
   değer olarak ata
18. end while
19. return en iyi çözüm kümesi ve elde edilen global
   optimum sonuç

```

Şekil 3. Adaptif Sinüs Kosinüs Algoritması sözde kodu

### 3. Deneysel ve Sonuçlar

ASKA iyi bilinen sürü tabanlı algoritmalarından Parçacık Sürü Optimizasyonu[8] (PSO), Karınca Koloni Optimizasyonu (KKO)[9] Algoritması ve güncel algoritmalar Balina Optimizasyon Algoritması (BOA)[10], Yerçekimi Arama Algoritması (YAA)[11], Sinüs Kosinüs Algoritması (SKA)[7] olmak üzere 5 metasezgisel algoritma ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan algoritmalarda kullanılan parametreler şu şekildedir:

1. PSO: Atalet ağırlığı = 1, Atalet ağırlığı sönüm oranı = 0.99, Kişisel öğrenme katsayısı = 1.5, Küresel öğrenme katsayısı = 2.0
2. KKO: Örnek boyutu = 40, Yoğunlaşma faktörü = 0.5, Sapma - uzaklık oranı=1
3. BOA: b = 1
4. YAA: R\_norm = 2, R\_gücü = 1, Elitist kontrolü = 1
5. SKA: t = 2, c = 2

Algoritmaların popülasyon büyüklüğü 30 ve iterasyon sayıları 1000 olarak kabul edilmiştir. Boyutları fonksiyon tanımlarında  $Vno$  olarak belirtilen her kalite testi fonksiyonu için algoritmalar 30 kez çalıştırılmıştır. Tablo 1'de gösterilen F1 - F7 arasındaki fonksiyonlar tek modlu fonksiyonlardır ve bir tek global optimuma sahiptirler. Bu fonksiyonlar arama

algoritmalarının yakınsama oranını test etmek için tasarlanmıştır. Birden fazla lokal minimuma sahip olan ve bundan dolayı optimize edilmesi oldukça zor olan F8 – F13 arasındaki çok modlu fonksiyonlar Tablo 2’de gösterilmiştir. Çok modlu fonksiyonlarda problem boyutu sayısı arttıkça yerel optimum sayısı da artmaktadır. Bu nedenle bu tür test problemleri optimizasyon algoritmalarının arama kapasitelerini değerlendirmede oldukça önemlidir. Tablo 3’te gösterilen F14 – F23 arasındaki sabit boyutlu çok modlu fonksiyonların çok modlu fonksiyonlardan tek farkı boyutlarının düşük sayıda olmasından

dolayı az sayıda yerel minimum içermeleridir. Tablo 1 – 3 te verilen yirmi üç kıyaslama fonksiyonlarına ait sonuçlar sırasıyla Tablo 4-6 da verilmiştir. Tablolarda verilen kısaltmalar; *F*: fonksiyon adı, *İ*: istatistik sonuçları *ort*: 30 çalıştırmadaki ortalama çözüm, *sd*: 30 çalıştırmadaki standart sapmayı, *en iyi*: 30 çalıştırmadaki en iyi çözümü, *en kötü*: 30 çalıştırmadaki en kötü çözümü, *süre*: saniye cinsinden ortalama çalışma süresini, ifade etmektedir.

**Tablo 1.** Tek modlu kalite testi fonksiyonlarının tanımı

Fonksiyon	Formülasyon	$V_{no}$	Aralık	$F_{min}$
<i>Hyper Sphere</i>	$F_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	30	[-100, 100]	0
<i>MultiModal</i>	$F_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2  x_i  + \prod_{i=1}^n  x_i $	30	[-10, 10]	0
<i>Schwefel (02)</i>	$F_3(x) = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^i x_j)^2$	30	[-100, 100]	0
<i>Schwefel (21)</i>	$F_4(x) = \max\{ x_i , 1 \leq i \leq n\}$	30	[-100, 100]	0
<i>Rosenbrock</i>	$F_5(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	30	[-30, 30]	0
<i>Step</i>	$F_6(x) = \sum_{i=1}^n ([x_i + 0.5])^2$	30	[-100, 100]	0
<i>Quartic</i>	$F_7(x) = \sum_{i=1}^n ix_i^4 + \text{random}[0,1]$	30	[-1.28, 1.28]	0

**Tablo 2.** Çok modlu kalite testi fonksiyonlarının tanımı

Fonksiyon	Formülasyon	$V_{no}$	Aralık	$F_{min}$
<i>Schwefel (26)</i>	$F_8(x) = \sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	30	[-500, 500]	-418.9829 x 5
<i>Rastrigin</i>	$F_9(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	30	[-5.12, 5.12]	0
<i>Ackley</i>	$F_{10}(x) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$	30	[-32, 32]	0
<i>Griwank</i>	$F_{11}(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{i}\right) + 1$	30	[-600, 600]	0
<i>Penalty(01)</i>	$F_{12}(x) = \frac{\pi}{n} \{10 \sin(\pi y_1) + \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(\pi y_{i+1})] + (y_n - 1)^2 + \sum_{i=1}^n u(x_i, 10, 100, 4)\}$ $y_i = 1 + \frac{x_i + 1}{4} u(x_i, a, k, m) = \begin{cases} k(x_i - a)^m & x_i > a \\ 0 & -a < x_i < a \\ k(-x_i - a)^m & x_i < -a \end{cases}$	30	[-50, 50]	0
<i>Penalty(02)</i>	$F_{13}(x) = 0.1 \{ \sin^2(3\pi x_1) + \sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi x_i + 1)] + (x_n - 1)^2 [1 + \sin^2(2\pi x_n)] \} + \sum_{i=1}^n u(x_i, 5, 100, 4)$	30	[-50, 50]	0

**Tablo 3.** Sabit boyutlu çok modlu kalite testi fonksiyonlarının tanımları

Fonksiyon	Formülasyon	$V_{no}$	Aralık	$F_{min}$
De Jong (5)	$F_{14}(x) = (\frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{j + \sum_{i=1}^j (x_i - a_{ij})^6})^{-1}$	2	[-65, 65]	1
Kowalik	$F_{15}(x) = \sum_{i=1}^{11} [a_i - \frac{x_1(b_i^2 + b_i x_2)}{b_i^2 + b_i x_3 + x_4}]^2$	4	[-5, 5]	0.00030
Six Hump Camel Back	$F_{16}(x) = 4x_1^2 - 2.1x_1^4 + \frac{1}{3}x_1^6 + x_1x_2 - 4x_2^2 + 4x_2^4$	2	[-5, 5]	-1.0316
Branin (01)	$F_{17}(x) = (x_2 - \frac{5.1}{4\pi^2}x_1^2 - 6)^2 + 10(1 - \frac{1}{8\pi})\cos x_1 + 10$	2	[-5, 5]	0.398
Goldstein & Price I	$F_{18}(x) = [1 + (x_1 + x_2 + 1)^2(19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2)] \times [30 + (2x_1 - 3x_2)^2 \times (18 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2)]$	2	[-2, 2]	3
Hartmann (H3,4)	$F_{19}(x) = -\sum_{i=1}^4 c_i \exp(-\sum_{j=1}^3 a_{ij}(x_j - p_{ij})^2)$	3	[1, 3]	-3.86
Hartmann (H6,4)	$F_{20}(x) = -\sum_{i=1}^4 c_i \exp(-\sum_{j=1}^6 a_{ij}(x_j - p_{ij})^2)$	6	[0, 1]	-3.32
Shekel (m=5)	$F_{21}(x) = -\sum_{i=1}^5 [(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i]^{-1}$	4	[0, 10]	-10.1532
Shekel (m=7)	$F_{22}(x) = -\sum_{i=1}^7 [(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i]^{-1}$	4	[0, 10]	-10.4028
Shekel (m=10)	$F_{23}(x) = -\sum_{i=1}^5 [(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i]^{-1}$	4	[0, 10]	-10.5363

**Tablo 4.** Tek modlu kalite testi fonksiyonları sonuçları

F	$\hat{I}$	ASKA	PSO	SKA	BOA	KKO	YAA
F1	ort	4.1321e-137	6.5085e-16	0.0310	1.4109e-154	1.2766	1.0976e-16
	sd	2.2632e-136	1.1800e-15	0.0866	7.0872e-154	0.8429	3.5117e-17
	en iyi	2.5945e-179	1.0232e-17	2.4792e-06	3.3634e-166	0.4405	6.6897e-17
	en kötü	1.2396e-135	5.4858e-15	0.3945	3.8875e-153	4.4251	2.1405e-16
	süre	1.01338	8.3309	1.2570	4.2849	43.7911	12.0372
F2	ort	1.3305e-70	2.1071e-05	2.1026e-05	5.0254e-102	3.6260e+03	5.2733e-08
	sd	4.3038e-70	1.0554e-04	4.3726e-05	1.9523e-101	1.9618e+04	1.6126e-08
	en iyi	8.3720e-84	6.9921e-10	2.9768e-09	1.4491e-114	1.1190	2.7875e-08
	en kötü	2.1926e-69	5.7914e-04	2.1087e-04	9.2622e-101	1.0750e+05	1.0028e-07
	süre	1.12487	8.5741	1.3360	4.5383	46.1645	10.7295
F3	ort	2.3615e-71	7.6568	4.0282e+03	1.9940e+04	1.0596e+05	432.9601
	sd	1.2678e-70	5.5415	3.2698e+03	1.1221e+04	2.9680e+04	155.3030
	en iyi	9.8711e-120	1.0370	109.8140	3.6202e+03	4.7676e+04	217.7493
	en kötü	6.9476e-70	22.0031	1.4489e+04	4.3344e+04	1.6262e+05	780.2057
	süre	5.92186	17.1235	6.2230	9.6729	51.2220	14.0386
F4	ort	7.9899e-69	0.6941	19.9222	40.8308	78.1506	1.5515
	sd	4.3646e-68	0.3446	11.2356	32.4037	9.6495	1.5699
	en iyi	4.6344e-89	0.2272	1.5395	0.0519	42.8106	1.0044e-08
	en kötü	2.3908e-67	1.3777	42.7265	92.0102	92.1774	5.3571
	süre	1.42658	12.2517	1.6804	5.2079	39.2201	7.3923
F5	ort	0.0337	41.3337	1.0127e+03	27.2594	5.0124e+04	36.3915
	sd	0.0428	32.4499	2.8445e+03	0.6228	4.5712e+04	53.9666
	en iyi	1.0003e-04	2.3651	28.3801	26.5891	6.4021e+03	24.5371
	en kötü	0.1531	110.3879	1.2227e+04	28.7495	1.9159e+05	322.0843
	süre	1.55189	11.0633	1.7429	4.7569	38.6504	9.5483
F6	ort	0.0020	2.7841e-15	4.5788	0.1062	1.0898	0.2000
	sd	0.0029	8.7185e-15	0.5852	0.1165	0.5781	0.7611
	en iyi	8.5915e-06	1.7238e-17	3.8463	0.0094	0.4107	0
	en kötü	0.0120	4.7394e-14	6.7212	0.4399	3.1241	4.0000
	süre	1.52137	9.5745	1.8441	4.7322	36.7716	10.1557
F7	ort	7.1326e-05	0.0148	0.0421	0.0024	0.1854	0.0647
	sd	7.7696e-05	0.0059	0.0528	0.0023	0.0757	0.0254
	en iyi	2.2908e-07	0.0063	0.0047	5.6430e-05	0.0546	0.0094
	en kötü	3.9592e-04	0.0282	0.2775	0.0090	0.4039	0.1131
	süre	2.03204	8.5231	2.3571	6.2950	42.1256	10.7440

Tablo 4 de verilen tek modlu kalite testi fonksiyonlarına ait istatistiksel sonuçları incelendiğinde ASKA'nın optimum sonuca karşılaştırılan diğer tüm algoritmalarından (SKA, PSO, BOA, KKO, YAA) çok daha kısa sürede

yakınsadığı açıkça görülmektedir. ASKA, F1, F3, F5 ve F7 fonksiyonlarında en başarılı algoritma olmuştur. F2 fonksiyonunda BOA, F6 fonksiyonunda ise PSO en başarılı algoritmalar olmuştur.

**Tablo 5.** Çok modlu kalite testi fonksiyonları sonuçları

F	İ	ASKA	PSO	SKA	BOA	KKO	YAA
F8	ort	-1.2569e+04	-6.3686e+03	-3.9367e+03	-1.1224e+04	-4.4590e+149	-2.4485e+03
	sd	0.0103	867.5216	258.2417	1.6018e+03	2.4407e+150	425.4308
	en iyi	-1.2569e+04	-8.0276e+03	-4.5524e+03	-1.2569e+04	-1.3368e+151	-3.5570e+03
	en kötü	-1.2569e+04	-4.3764e+03	-3.5344e+03	-7.8490e+03	-3.0059e+98	-1.7879e+03
	süre	1.74441	8.6910	2.0996	5.0582	40.6682	9.4981
F9	ort	0	44.7399	23.4859	0	252.9477	27.0629
	sd	0	13.7505	32.5145	0	18.7779	6.2785
	en iyi	0	23.8790	6.9014e-06	0	193.7615	17.9093
	en kötü	0	81.5864	168.7336	0	276.6462	41.7882
	süre	1.66793	9.8125	1.9521	4.8869	39.8226	13.6292
F10	ort	8.8818e-16	1.0915	12.6852	4.0856e-15	0.6876	7.8281e-09
	sd	0	0.7594	9.5190	2.3511e-15	0.3804	1.6719e-09
	en iyi	8.8818e-16	2.7719e-09	2.5556e-04	8.8818e-16	0.1548	5.7326e-09
	en kötü	8.8818e-16	2.3162	20.3227	7.9936e-15	1.7909	1.3408e-08
	süre	1.74515	10.4712	2.1039	5.0623	42.3656	15.1583
F11	ort	0	0.0240	0.3685	0.0050	0.9188	8.2013
	sd	0	0.0246	0.3339	0.0193	0.0798	3.2014
	en iyi	0	0	7.5275e-04	0	0.6492	2.6444
	en kötü	0	0.0860	0.9431	0.0875	1.0283	14.4065
	süre	1.90766	11.9485	2.2472	5.6325	41.3976	14.9480
F12	ort	5.5727e-05	0.2319	3.1533	0.0110	3.2754e+04	0.1608
	sd	1.0953e-04	0.5471	6.2240	0.0177	7.9615e+04	0.2849
	en iyi	4.6736e-08	1.0560e-18	0.3258	0.0012	18.9615	3.5333e-19
	en kötü	5.2938e-04	2.7038	33.4485	0.0956	3.2040e+05	1.4847
	süre	3.67295	16.8464	3.9721	4.5318	42.5764	15.5377
F13	ort	6.4582e-04	0.1020	18.5548	0.1962	8.1417e+04	0.0033
	sd	7.6868e-04	0.4602	65.8292	0.1581	1.1285e+05	0.0104
	en iyi	6.5958e-06	5.5146e-18	2.2029	0.0398	961.1513	4.1030e-18
	en kötü	0.0032	2.5085	365.0753	0.7707	3.9818e+05	0.0548
	süre	3.65425	11.5014	3.9894	7.6812	43.5993	13.4597

Tablo 5 deki çok modlu kalite testi fonksiyonlarına ait istatistiksel sonuçlara göre, ASKA, F8-F13 fonksiyonların tamamında en iyi

sonucu veren algoritma olmuştur. F8, F9 ve F11 fonksiyonlarında ise optimum sonucu elde etmiştir.

**Tablo 6.** Sabit boyutlu çok modlu kalite testi fonksiyonları sonuçları

F	İ	ASKA	PSO	SKA	BOA	KKO	YAA
F14	ort	1.2626	4.4098	1.5275	2.7961	1.3235	3.4221
	sd	0.6860	2.9700	0.8922	3.2852	1.7829	2.6992
	en iyi	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980
	en kötü	2.9821	11.7187	2.9821	10.7632	10.7632	13.8192
	süre	8.50384	20.2909	10.3350	10.0869	19.4695	17.3979
F15	ort	3.8053e-04	3.4190e-04	9.7180e-04	5.6780e-04	0.0011	0.0023
	sd	7.1784e-05	1.6780e-04	3.8543e-04	2.7009e-04	3.1570e-04	8.7184e-04
	en iyi	3.1178e-04	3.0749e-04	3.4077e-04	3.0836e-04	8.8731e-04	6.2116e-04
	en kötü	5.9624e-04	0.0012	0.0015	0.0015	0.0019	0.0052
	süre	1.63308	9.4237	1.9942	2.0983	8.7483	9.6892
F16	ort	-1.0316	-1.0316	-1.0316	-1.0316	-1.0316	-1.0316
	sd	2.1956e-05	6.7752e-16	2.5344e-05	1.6070e-10	6.7752e-16	4.8787e-16
	en iyi	-1.0316	-1.0316	-1.0316	-1.0316	-1.0316	-1.0316
	en kötü	-1.0315	-1.0316	-1.0315	-1.0316	-1.0316	-1.0316
	süre	1.19193	9.8322	1.3675	1.4481	5.5078	7.5780

**Tablo 6.** Sabit boyutlu çok modlu kalite testi fonksiyonları sonuçları (devam)

<i>F</i>	<i>İ</i>	ASKA	PSO	SKA	BOA	KKO	YAA
F17	<i>ort</i>	0.3981	0.3979	0.3985	0.3979	0.3979	0.3979
	<i>sd</i>	4.8979e-04	0	6.0681e-04	3.9088e-06	0	0
	<i>en iyi</i>	0.3979	0.3979	0.3979	0.3979	0.3979	0.3979
	<i>en kötü</i>	0.3998	0.3979	0.4003	0.3979	0.3979	0.3979
	<i>süre</i>	0.7232	7.8293	1.2613	1.3837	5.69707	7.2001
F18	<i>ort</i>	3.0002	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000
	<i>sd</i>	2.3677e-04	1.7954e-15	3.2611e-05	9.2119e-05	1.3194e-15	3.1250e-15
	<i>en iyi</i>	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000
	<i>en kötü</i>	3.0008	3.0000	3.0001	3.0005	3.0000	3.0000
	<i>süre</i>	0.76903	9.1013	1.3814	1.4617	5.8880	7.2429
F19	<i>ort</i>	-3.8146	-3.8370	-3.8551	-3.8609	-3.8628	-3.8628
	<i>sd</i>	0.0800	0.1411	0.0024	0.0022	2.7101e-15	2.2913e-15
	<i>en iyi</i>	-3.8627	-3.8628	-3.8618	-3.8628	-3.8628	-3.8628
	<i>en kötü</i>	-3.6144	-3.0898	-3.8519	-3.8549	-3.8628	-3.8628
	<i>Süre</i>	2.05760	10.1333	2.3266	2.4045	7.7821	9.2076
F20	<i>ort</i>	-2.9617	-3.2863	-2.8866	-3.2429	-3.2665	-3.3220
	<i>sd</i>	0.2679	0.0554	0.4145	0.1113	0.0603	1.4889e-15
	<i>en iyi</i>	-3.2900	-3.3220	-3.2333	-3.3219	-3.3220	-3.3220
	<i>en kötü</i>	-2.0038	-3.2031	-1.2291	-2.9868	-3.2031	-3.3220
	<i>süre</i>	2.09464	9.9590	1.8505	3.1532	11.7540	8.5954
F21	<i>ort</i>	-10.1516	-5.4786	-2.2850	-9.0471	-5.6870	-6.4134
	<i>sd</i>	0.0033	3.4558	1.8892	2.2807	3.7094	3.6846
	<i>en iyi</i>	-10.1532	-10.1532	-5.9900	-10.1530	-10.1532	-10.1532
	<i>en kötü</i>	-10.1375	-2.6305	-0.4965	-2.6303	-2.6829	-2.6305
	<i>süre</i>	2.30390	11.3522	2.6262	2.7609	11.0864	8.8242
F22	<i>ort</i>	-10.4017	-6.9147	-3.5487	-7.7342	-6.8594	-10.4029
	<i>sd</i>	0.0025	3.6103	1.6587	2.9214	2.5485	1.4378e-15
	<i>en iyi</i>	-10.4029	-10.4029	-5.2185	-10.4027	-10.4029	-10.4029
	<i>en kötü</i>	-10.3923	-2.7519	-0.9071	-3.7235	-5.0877	-10.4029
	<i>süre</i>	3.05327	11.5451	3.1160	3.1399	14.0219	9.9985
F23	<i>ort</i>	-10.5352	-5.9754	-4.0940	-8.5166	-7.2484	-10.2897
	<i>sd</i>	0.0029	3.6315	1.7448	2.9532	3.0040	1.3511
	<i>en iyi</i>	-10.5363	-10.5363	-7.9749	-10.5363	-10.5363	-10.5363
	<i>en kötü</i>	-10.5221	-2.4217	-0.9460	-2.4217	-2.4217	-3.1359
	<i>süre</i>	3.14048	12.0961	3.5207	3.8171	13.2174	11.2024

Tablo 6 daki sabit boyutlu çok modlu kıyaslama fonksiyonlarının istatistiksel sonuçlar incelendiğinde, Kalite testi fonksiyonları sonuçları incelendiğinde F14, F16- F18, F21-F23 fonksiyonunda ASKA ve diğer optimizasyonlardan bazıları en iyi çözüm değerine bakıldığında optimum sonuca erişmişlerdir. F19 fonksiyonunda sadece ASKA optimum sonuca erişirken, F15 ve F17 fonksiyonlarında optimum sonuca erişen optimizasyon olmamıştır.

Sayısal optimizasyon problemlerinin çözümü için önerilen algoritmaların başarımını kıyaslamak için parametrik olmayan testlerden Wilcoxon işaretli sıralar testi uygulanmıştır [12].

İstatistiksel anlamlılık değeri  $\alpha = 0.05$  olmak üzere ASKA ile diğer metasezgisel algoritmalar arasında Wilcoxon işaretli sıralar testi yapılarak

istatistiksel sonuçlar Tablo 7’de gösterilmiştir. Burada  $p < 0.05$  olması durumu karşılaştırılan algoritmalar arasında elde edilen sonuçlar arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir farkın olduğunu göstermektedir. Ayrıca  $R^+$  ASKA’nın karşılaştırılan algoritmaya göre daha üstün sonuçlar elde ettiği rankların toplamını gösterirken,  $R^-$  ise karşılaştırılan algoritmanın ASKA’ya göre daha üstün sonuçlar elde ettiği rankların toplamını gösterir.  $K$  kazanma durumunu ifade eder.

Tablo 7’deki Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçlarına göre ASKA 23 kalite testi fonksiyonu üzerinden; SKA’ya karşı 21/2, PSO’ya karşı 16/7, BOA’ya karşı 16/7, KKO’ya karşı 16/7, YAA’ya karşı 14/9 üstün gelmektedir.

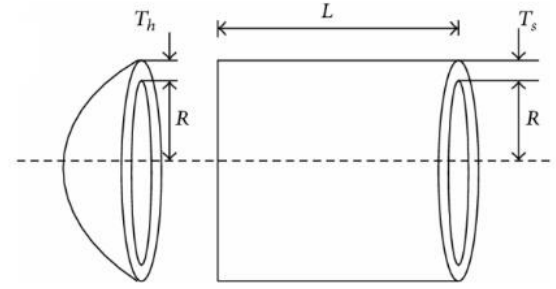
**Tablo 7.** Wilcoxon işaretli sıralar testi karşılaştırma sonuçları

F	SKA / ASKA				PSO / ASKA				BOA / ASKA				KKO / ASKA				YAA / ASKA			
	p - value	R <sup>+</sup>	R <sup>-</sup>	K	p-değeri	R <sup>+</sup>	R <sup>-</sup>	K	p - value	R <sup>+</sup>	R <sup>-</sup>	K	p - value	R <sup>+</sup>	R <sup>-</sup>	K	p - value	R <sup>+</sup>	R <sup>-</sup>	K
F1	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	2.23e-04	53	412	-	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+
F2	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	0	465	-	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+
F3	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+
F4	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+
F5	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+
F6	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	0	465	-	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	0.0028	87	378	-
F7	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.92e-06	464	1	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+
F8	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	0	465	-	1.73e-06	465	0	+
F9	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	1	0	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+
F10	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.33e-05	253	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+
F11	1.73e-06	465	0	+	2.56e-06	435	0	+	0.5000	3	0	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+
F12	1.73e-06	465	0	+	0.6435	255	210	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	0.0166	349	116	+
F13	1.73e-06	465	0	+	0.3820	275	190	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+	0.0571	140	325	-
F14	0.0020	383	82	+	1.13e-05	446	19	+	0.4405	270	195	+	3.11e-05	30	435	-	1.64e-05	442	23	+
F15	1.73e-06	465	0	+	1.60e-04	49	416	-	4.90e-04	402	63	+	1.73e-06	465	0	+	1.73e-06	465	0	+
F16	0.7189	250	215	+	1.73e-06	0	465	-	1.73e-06	0	465	-	1.73e-06	0	465	-	1.73e-06	0	465	-
F17	5.71e-04	400	65	+	1.73e-06	0	465	-	6.33e-06	13	452	-	1.73e-06	0	465	-	1.73e-06	0	465	-
F18	0.0064	100	365	-	1.73e-06	0	465	-	0.0024	85	308	-	1.73e-06	0	465	-	1.73e-06	0	465	-
F19	0.4165	193	272	-	3.11e-05	30	435	-	6.16e-04	66	399	-	1.73e-06	0	465	-	1.73e-06	0	465	-
F20	0.6733	253	212	+	1.73e-06	0	465	-	1.02e-05	18	447	-	2.60e-06	4	461	-	1.73e-06	0	465	-
F21	1.73e-06	465	0	+	2.61e-04	410	55	+	0.0024	380	85	+	0.0015	387	78	+	0.0087	360	105	+
F22	1.73e-06	465	0	+	0.0207	345	120	+	2.37e-05	438	27	+	2.61e-04	410	55	+	1.73e-06	0	465	-
F23	1.73e-06	465	0	+	6.15e-04	399	66	+	1.63e-05	442	23	+	0.0036	374	91	+	3.12e-05	30	435	-

Önerilen yeni adaptif algoritma, mühendislik tasarım problemlerinden biri olan basınçlı kap probleminin çözümünde kullanılarak algoritmanın kısıtlı problemler üzerindeki etkinliği test edilmiştir. ASKA ve karşılaştırılan diğer algoritmalar (PSO, SKA, BOA, KKO, YAA) basınçlı kap problemi üzerinde test edilirken popülasyon sayısı 200, iterasyon sayısı 10000 olarak belirlenmiştir ve algoritmalar 30 kez çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 8'de, Wilcoxon sıra toplam testi istatistiksel sonuçları Tablo 9'da gösterilmektedir.

Şekil 4'te gösterildiği gibi silindirik bir kabın her iki ucu yarı küresel başlıklarla kapalıdır. Burada amaç; malzeme, şekillendirme ve kaynak maliyeti olmak üzere toplam maliyeti en aza indirmektir. Bu problemde dört tasarım değişkeni vardır:  $T_s$  (kabuk kalınlığı,  $x_1$ ),  $T_h$  (başım kalınlığı,  $x_2$ ),  $R$  (iç yarıçap,  $x_3$ ) ve  $L$  (kabın silindirik bölümünün başlık haricindeki uzunluğu,  $x_4$ ) [13].

Bu problem 4 kısıttan oluşur. Bu kısıtlar ve problem Denklem 2'de gösterilmektedir.


**Şekil 4.** Basınçlı kap problemi

$$\begin{aligned}
 \min f(\vec{x}) &= 0.6224x_1x_3x_4 + 1.7781x_2x_3^2 + 3.1661x_1^2x_4 + 19.84x_1^2x_3 \\
 \text{s.t. } g_1(\vec{x}) &= -x_1 + 0.0193x_3 \leq 0 \\
 g_2(\vec{x}) &= -x_2 + 0.00954x_3 \leq 0 \\
 g_3(\vec{x}) &= -\pi x_3^2x_4 - \frac{4}{3}\pi x_3^3 + 1.296000 \leq 0 \quad (2) \\
 g_4(\vec{x}) &= x_4 - 240 \leq 0 \\
 \text{Değişken aralığı} & \quad 0 \leq x_1 \leq 99, \\
 & \quad 0 \leq x_2 \leq 99, \\
 & \quad 10 \leq x_3 \leq 200, \\
 & \quad 10 \leq x_4 \leq 200
 \end{aligned}$$



**Tablo 8.** Basınçlı kap problemi karşılaştırma sonuçları

Algoritma	Optimum değişkenler				Optimum Maliyet	Süre
	$T_s$	$T_h$	$R$	$L$		
ASKA	0.778566726025	0.387863076807	40.322074399104	200	<b>5897.91316</b>	<b>59.53190</b>
PSO	0.828797029813	0.409674804493	42.942851305476	166.44667183143	5977.62589	517.86163
SKA	0.780408762923	0.386271554329	40.406252027563	200	5920.53556	59.77302
BOA	0.778189825887	0.390165645138	40.319639981412	199.99970408291	5901.42948	87.78191
KKO	0.921103032395	0.455301706112	47.725545735306	117.48048122090	6177.27956	498.07486
YAA	0.896775543832	0.443276615916	46.465054100846	129.12087575297	6120.54193	2907.64910

**Tablo 9.** Basınçlı kap problemi Wilcoxon sıra toplam testi karşılaştırma sonuçları

	PSO / ASKA	SKA / ASKA	BOA / ASKA	KKO / ASKA	YAA / ASKA
$p$ - değeri	0.0056	8.5641e-04	0.3555	0.0020	0.0083

ASKA basınçlı kap problemini **59.53190** saniyede çözerek problemin minimum maliyetini **5897.91316** olarak bulması yapılan iyileştirmenin gücünü kanıtlamaktadır. Çalışma zamanı ve minimum maliyeti bulma açısından ASKA basınçlı kap probleminin çözümünde karşılaştırılan algoritmalar arasında en iyi sonucu vermektedir. Tablo 9'da verilen Wilcoxon sıra toplamı testi karşılaştırma sonuçlarına göre de ASKA'nın rakiplerine karşı üstün geldiği açıkça görülmektedir.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, SKA üzerinde iyileştirmeler yapılarak geliştirilen Adaptif Sinüs Kosinüs Algoritması (ASKA) 23 kalite testi fonksiyonu ve mühendislik tasarım problemlerinden biri olan basınçlı kap probleminin çözümünde test edilmiştir. Ayrıca stokastik yöntemlerin performansının daha güvenilir bir şekilde belirlenmesini sağlayan istatistiksel testlerden Wilcoxon sıra toplamı testi kullanılarak algoritmalarından elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarından önerilen yeni algoritmanın SKA'ya ve karşılaştırılan diğer algoritmalara göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Wilcoxon sıra toplamı testi sonuçları da ASKA'nın diğer algoritmalara karşı üstünlüğünü kanıtlamaktadır.

#### 5. Kaynaklar

1. Tanyildizi, E. and Demir, G. (2017). "Golden Sine Algorithm: A Novel Math-Inspired Algorithm", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, **17(2)**:71-78.

2. H. Eskandar, A. Sadollah, A. Bahreininejad and M. Hamdi, (2012). "M. Water cycle algorithm—a novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems", *Computers & Structures*, **110-111**:151-166.
3. Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer, *Adv Eng Softw*, **69**, 46-61.
4. K. S. Lee, Z. W. Geem, (2005). "A new metaheuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **194**:3902–3933,
5. A. Prakasam, N. Savarimuthu, (2015). "Metaheuristic Algorithms and Polynomial Turing Reductions: A Case Study Based on Ant Colony Optimization", *Procedia Computer Science*, vol.46, pp. 388 – 395,
6. I. Fister Jr., X. S. Yang, D. Fister, I. Fister, (2013). "A brief review of nature-inspired algorithms for optimization", *Elektrotehniski Vestnik*, **80(3)**: 1-7,
7. Mirjalili, S. (2016). SCA: A sine cosine algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-Based Systems*, **96**, 120-133.
8. Kennedy, J., Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization in neural networks, *IEEE International Conference*, **4**, 1942–1948.
9. Dorigo, M. (1992). Optimization, learning and natural algorithms. Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano, Italy.
10. Mirjalili, S., Mirjalili, S.M. (2016). The whale optimization algorithm, *Adv Eng Softw*, **95**, 51-67.
11. Rashedi, E., Pour H.N., Saryazdi, S. (2009). GSA: a gravitational search algorithm, *Information sciences*, **179(13)**, 2232-2248.

12. Derrac, J., García, S., Molina, D., Herrera, F., (2011). A practical tutorial on the use of non-parametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms, *Swarm Evol. Comput.* **1**:3–18.
13. Nasseri, S.H., Alizadeh, Z., Taleshian, F., (2012). Optimized solution of pressure vessel design using geometric programming. *The Journal of Mathematics and Computer Science.* **4**(3):344 – 349.

## FPGA Donanımı Üzerinde Çalışan Elma Sınıflandırma ve Boyutlandırma Sistemi

Eser SERT

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye  
esersert80@gmail.com

(Geliş/Received: 24.02.2018; Kabul/Accepted: 07.08.2018)

### Özet

FPGA (Field Programmable Gate Array) teknolojisi ile görüntü işleme, veri madenciliği, nesne tanıma gibi uygulamalar yüksek performansta gerçekleştirilebilmektedir. FPGA'daki üstün mimari yapısı sayesinde görüntü işleme uygulamalarında çok hızlı şekilde sonuçlar alınabilmektedir. Bu donanım bilgisayardan bağımsız olarak çalıştığından yapılan çalışmanın mobilleşmesi sağlanmaktadır, bu ve benzeri avantajlarından dolayı çalışmada FPGA tercih edilmiştir. Tasarlanan sistemle gerçek zamanlı olarak granny smith (GS) ve starking (ST) tür elmaların genişlik ölçümü ve renge bağlı olarak sınıflandırma işlemleri yapılmaktadır. Çalışmada, segmentasyon ve sınıflandırma işlemlerinde kullanılan en başarılı danışmansız öğrenme yöntemlerinden birisi olan K-means kümeleme metodu tercih edilmiştir. Bu metot çalışmamıza uygun şekilde modifiye edilerek VHDL (Very High Design Language) diliyle FPGA'da uygulanmıştır. Tasarlanan sistem üzerinde yapılan test işlemlerinde 100 adet elma için ortalama % 2.09 bağıl hata ile elma genişliği ölçülmüş ve %94 başarı ile elma sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** FPGA, VHDL, K-means, Elma Sınıflandırma

### Apple Classification and Dimensioning System Based that Runs on FPGA Hardware

#### Abstract

Thanks to FPGA technology, applications such as image and video processing, data mining and pattern recognition can display better performance. Its superior hardware features can help reach quick and accurate results in these applications. In addition, the designed system can operate in mobile mode as because FPGA hardware is a standalone processing unit, making FPGA favorable for this study. In this study, K-means clustering algorithm was used because it is one of the most successful unsupervised learning algorithms in the segmentation and classification of granny smith (GS) and starking (ST) apples. After the algorithm was modified in a suitable way to our study, the algorithm was applied to FPGA hardware in VHDL (Very High Design Language) language. The designed system measures the width of apples and classifies them based on their color in real time. The designed system tested with 100 apples demonstrated that the width of the apples was measured with a mean error of % 2.09, and apples were classified with a success rate of % 94.

**Keywords:** FPGA, VHDL, K-means, Apple Classification

#### 1. Giriş

Endüstride birçok alanında nesne tanıma, sınıflandırma ve boyut ölçümü gibi işlemleri yapabilen otomasyon sistemlerine duyulan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Bu sistemler yüksek performans ve hızla gıda sektöründe sınıflandırma amacıyla kullanılmaktadır. Bu otomasyon sistemleri genellikle masaüstü bilgisayar ya da dizüstü bilgisayarlara bağlı

olarak çalıştığından mobil değildirler. Bu durum sistemin taşınabilirliği açısından dezavantajlara yol açmaktadır. Bu çalışmada bu problemlere çözüm sunabilmek için mobil düzeyde çalışan, elma sınıflandırma ve genişlik ölçüm sisteminin tasarımı FPGA donanımıyla gerçekleştirilmiştir. FPGA, Xilinx firması tarafından 1980'li yıllarda tanıtılmıştır. Bu donanımların yüksek işlem performansı, geniş depolama özellikleri ve üstün

devre mimarileri gibi avantajları bulunmaktadır [1].

FPGA teknolojisindeki hızlı gelişmeler ve satış fiyatlarının düşmesi, bu donanımların görüntü işleme uygulamaları, nesne tanıma ve veri madenciliği gibi alanlarda kullanımının yaygınlaşmasını sağlamıştır. FPGA'larla tasarım işlemi gerçekleştirilirken gerekli değişiklikler kolayca yapılabilmektedir ve simülasyon yazılımı hatalı donanım tasarımlarının görülmesini sağlamaktadır. Bu sistemlerin en önemli avantajlarından biriside yüksek performans gerektiren durumlarda paralel işlem yapabilmeleridir. Bu özelliklerinden dolayı görüntü işleme, veri madenciliği, nesne tanıma gibi uygulamalarda kullanımları yaygınlaşmaya başlamıştır. FPGA'ların diğer avantajı da bilgisayardan bağımsız bir şekilde mobil işlem yapabilmeleri ve üretmiş oldukları sonuçları ise sisteme dâhil edilmiş görüntüleme donanımlarında yâda monitörlerde gösterebilmeleridir. Bu avantajlarından dolayı [2] çalışmamızda FPGA kullanımı tercih edilmiştir.

Bu çalışmada FPGA ile 50 adet starking(ST) ve 50 adet granny smith (GS) türü elmanın gerçek zamanlı olarak sınıflandırması ve genişliğinin ölçülmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. İşlem sonuçları ise FPGA kartı üzerindeki LED ve LCD ekranda gösterilmiştir. Mobil düzeyde çalışmak üzere tasarlanan sistemin yüksek hızla sınıflandırma işlemlerini yapabildiği görülmüştür.

Meyve kalite kontrol, sınıflandırma ve segmentasyon konusunda yapılan çalışmalarda [3-7] meyve sınıflandırma işleminin genellikle masaüstü yâda dizüstü bilgisayarlar üzerinde yapıldığı görülmüştür. Naik ve ark. [8] meyve sınıflandırma ve derecelendirmesinde kullanılan temel süreçleri incelemiştir. Bu kapsamda kullanılan özellik çıkarım ve makine öğrenmesi metotları gözden geçirilmiştir. Dara ve ark.[9] çalışmalarında elma meyvelerini boyut gruplarına (Küçük, Orta ve Büyük) ayırmaya yönelik görüntü işleme ve YSA teknikleri kullanarak bir sistem tasarımı geliştirmişler. Jamdar ve ark. [10] elma meyvesi üzerindeki üç yaygın hastalığın saptanması ve sınıflandırılması için çalışma yapmışlardır. İlgili çalışmada segmentasyon için K-means kümeleme algoritması kullanılmıştır. Literatür özeti verilen

bu çalışmalarda da sınıflandırma işlemleri gömülü sistem üzerinde değil PC' de gerçekleştirilmiştir.

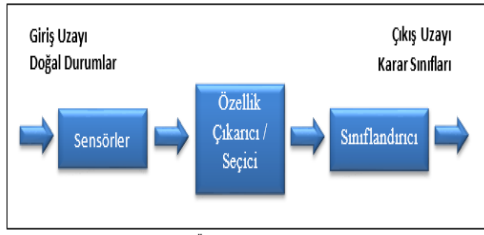
Pearson [11] çalışmasında renk farklılıkları veya küçük kusurları olan patlamış mısır ve buğday tanelerini tespit etmek ve ayırmak için FPGA tabanlı bir sistem tasarımı geliştirilmiştir. Nu'no-Maganda ve ark. [12] FPGA ile narenciye' nin piksel sınıflandırmasını yapmıştır. Ibarra-Manzano ve ark. [13] çalışmasında resimler üzerinde nesnelere saptamak için FPGA temelli mimariler önerilmiştir. Saegusa ve ark. [14] FPGA üzerinde çalışan K-means kümeleme temelli çalışan segmentasyon metodu sunmuşlardır.

Bu çalışmada elma ile zemini ayırmak ve sınıflandırma için K-means kümeleme algoritması kullanılmıştır. Ayrıca görüntüsü alınan her bir elmanın genişliğinin ölçümü de yapılmaktadır. Bu işlemlerin hepsi gerçek zamanlı olarak FPGA donanımı üzerinde yürütülmektedir. Fakat literatür çalışması yapıldığında meyve sınıflandırma sistemlerinin çoğunun gömülü sistemlerle değil PC tabanlı olarak çalıştığı görülmektedir. K-means algoritması danışmansız bir öğretim metodu olduğu için, yapay sinir ağları gibi zaman alıcı ve sorunların çıkabildiği eğitim sürecine gereksinim duymamaktadır. Bundan dolayı bu çalışmada K-means algoritması hızlı ve yüksek sınıflama doğruluğunda çözüm üretmiştir. Bu açılarından çalışma literatürdeki birçok meyve sınıflandırma sistemlerine göre üstünlükler içermektedir.

Çalışmada Bölüm 2'de örüntü tanıma, Bölüm 3'te sistemin çalışması, Bölüm 4'te deneysel sonuçlar ve Bölüm 5'te ise sonuç sunulmuştur.

## 2. Örüntü Tanıma

Ölçülendirme yapılabilen veya gözlenebilme özelliğinde olan bilgi türü örüntü olarak tanımlanmaktadır. Görüntü ve ses gibi bilgiler örüntü kavramı içerisine girmektedir. Örüntünün algılanması aşamasından sonra belirlenmiş olan kriterler doğrultusunda tanımlama ya da sınıflandırma işlemine örüntü tanıma denmektedir [15]. Örüntü tanıma blok diyagramı Şekil 1'de görülmektedir.

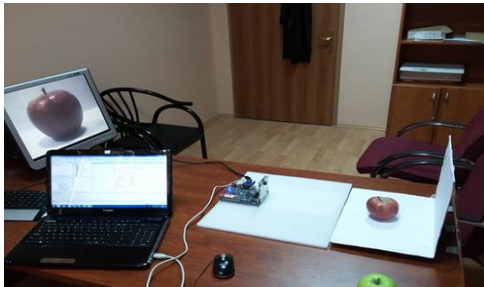


Şekil 1. Örüntü tanıma blok diyagramı

Algılayıcılar, herhangi bir anda dış ortamdan bilgi almaktadır. Burada kamera algılayıcı olarak kullanılmaktadır. Özellik çıkarıcı, yapılan ölçümlerin hepsinden oluşan giriş bilgilerinden sınıflandırıcı için gerekli olan bilgiyi çıkarmaktadır. Sınıflandırıcı ise belirlenen kısıtlara uygun olarak elmanın türünü tespit etmektedir. Algılayıcılar kısmında görüntünün (elma resmi) alınması gerçekleştirilmektedir. Özellik çıkarıcı/seçici bloğu sırasıyla, resmi gri düzeye çevirir ve filtrelemesini yapmaktadır. Sınıflandırıcı bloğu K-means kümeleme algoritması ile nesnenin sınıflandırılmasını yapmaktadır.

### 3. Sistemin Çalışması

Nesne tanıma ve genişlik ölçme sisteminde 100 adet elmanın genişlik ölçümü ve sınıflandırması gerçekleştirilmektedir. Şekil 2’de görülen elma sınıflandırma ve genişlik ölçüm sistemi için Altera DE-0 model FPGA kartı ve Terasic D5M kamera kullanılmıştır. 100 adet elma resminin aynı şekilde alınmasının ardından FPGA LED’lerinde sınıflandırma sonuçları gösterilmektedir.

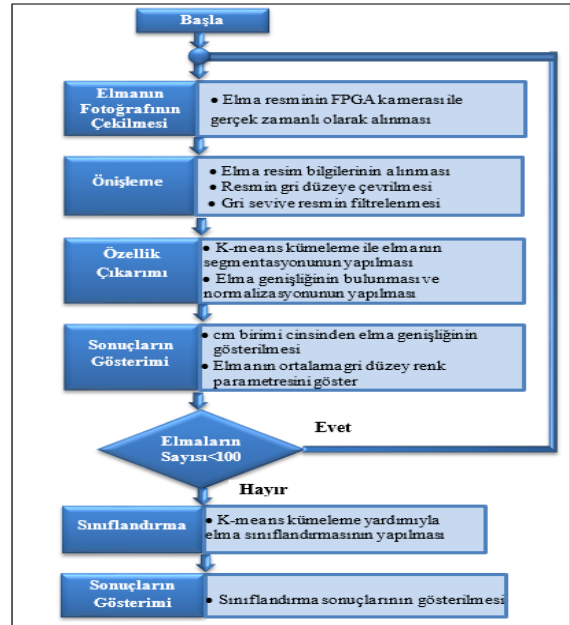


Şekil 2. Nesne Tanıma ve Genişlik Ölçüm Sisteminin Genel Yapısı

Şekil 3’te nesne tanıma ve genişlik ölçme sisteminin akış diyagramı görülmektedir. Sistemde ilk aşamada kameranın önüne

yerleştirilen elmanın fotoğrafı çekilmektedir ve ardından elmanın genişliği ve ortalama gri düzey değeri FPGA kartında gösterilecektir. İkinci adımda alınan resmin ön-işlemesi, üçüncü aşamada ön-işlemesi yapılan görüntünün özellik çıkarımı yapılmaktadır. Dördüncü adımda ise elmaya ait genişlik ve ortalama gri düzey değeri gösterilmektedir.

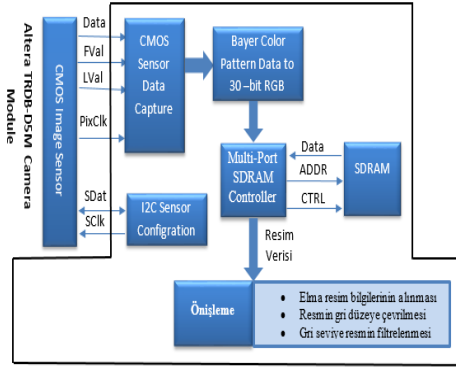
Bu işlem süreci 100 adet elma için tekrarlanacaktır. Son adımda 100 adet elmaya ait gri düzey verilerinin K-means kümeleme ile sınıflandırması gerçekleştirilerek elma sınıflandırma bilgileri FPGA kartı üzerindeki ledlerde gösterilecektir.



Şekil 3. Nesne tanıma ve ölçme sisteminin blok diyagramı

#### 3. 1. Elmanın fotoğrafının çekilmesi

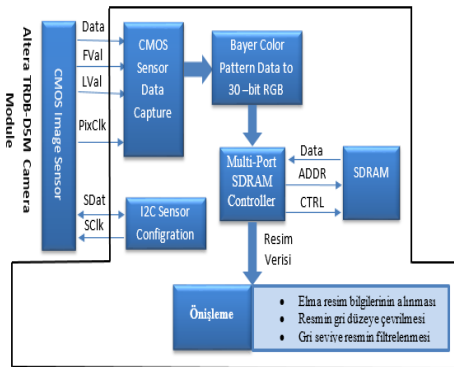
Bu bölümde elmanın resmi çekilip resim verileri ön-işleme bloğuna verilmektedir. Şekil 4’te bu süreçte yapılan işlemlerin akış diyagramı verilmiştir. FPGA kartı üzerinde bulunan butona basıldığında elma resmi çekilip RGB formatına çevrilmesinin ardından SDRAM’ e gönderilecektir. Sonra görüntü verisi SDRAM’ dan alınarak ön-işlemeye tabi tutulacaktır.



Şekil 4. Elmanın Fotoğrafının Alınmasını Gösteren Akış Diyagramı

### 3. 1. Elmanın fotoğrafının çekilmesi

Bu bölümde elmanın resmi çekilip resim verileri önişleme bloğuna verilmektedir. Şekil 4'te bu süreçte yapılan işlemlerin akış diyagramı verilmiştir. FPGA kartı üzerinde bulunan butona basıldığında elma resmi çekilip RGB formatına çevrilmesinin ardından SDRAM' e gönderilecektir. Sonra görüntü verisi SDRAM' dan alınarak ön-ışlemeye tabi tutulacaktır.



Şekil 4. Elmanın Fotoğrafının Alınmasını Gösteren Akış Diyagramı

### 3.2. Önişleme

Başlangıçta elma resmine ait R(Red), G(Green), B(Blue) bilgileri denklem 1'deki formüle bağlı olarak işlenerek resmin gri formata [15] dönüştürülmesi sağlanmaktadır. Ardından gri düzeydeki resme 3x3' lük ortalama (average) filtresi [16,17] uygulanmaktadır. Ortalama filtresinin uygulanmasında amaç gri formattaki resmin pikselleri arasında yumuşak geçiş sağlanarak parazit ve gürültülerin giderilmesini

sağlamaktadır. Şekil 5'te önişleme adımının özeti verilmiştir.

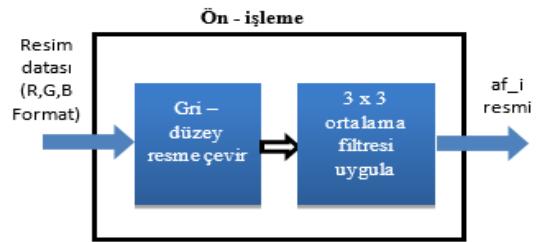
$$Grayscale = \frac{R+G+B}{3} \quad (1)$$

### 3.3. K-means kümeleme algoritması

K-means en yaygın kullanılan danışmansız öğrenme yöntemlerinden biridir [17]. Bu yöntem, tüm verilerin tek bir kümeye dâhil olmasını sağlar. Bu mekanizma N adet veriden oluşan bir veri dizisinin C kümeye bölünmesini sağlamaktadır. Bu işlem sürecinin en sonunda temel amaç, bölünme işlemi sonunda kümelere yüksek düzeyde benzerlik ve kümeler arasında düşük benzerlik düzeyine sahip olmaktır. Kümelemede yaygın şekilde karesel hata kriteri (HK) kullanılmaktadır. HK' nın değeri düştükçe kümeleme başarımı artmaktadır. Verilerin buldukları kümenin merkez noktalarına olan uzaklıklarının karelerinin toplamı aşağıdaki denklem [17] aracılığıyla bulunmaktadır:

$$HK = \sum_{x=1}^C \sum_{y=1}^N (mesafe^2(a_x, b_y)) \quad (2)$$

burada N değeri dizideki toplam eleman sayısı, C küme sayısıdır. mesafe iki veri arasındaki Öklid uzaklığı, b değeri kümedeki bir eleman, a değeri küme merkezidir.



Şekil 5. Önişleme adımı akış diyagramı

### 3.4. Segmentasyon süreci

Bu adımda, K-means kümeleme algoritması uygulanarak elmanın segmentasyonu yapılmaktadır. Bu işlemi yapmak için hazırlanan kodlar Algoritma 1'de verilmiştir. Algoritma aşağıda sıralanan adımları içermektedir:

### a. Başlangıç küme merkezlerinin belirlenmesi

Çalışmada küme sayısı 2 olarak ayarlandığından rastgele olarak seçilen 2 adet parlaklık değeri küme merkez başlangıç noktası olarak ayarlanmıştır. Algoritma 1'de 1 numaralı satırda bu işlem gerçekleştirilmektedir. Belirlenen iki farklı değer  $c_1$  ve  $c_2$  değişkenlerine aktarılmıştır.

### b. Küme merkezleri ile olan mesafelerin hesaplanması

Bu aşamada  $af_i$  resminin her bir pikselinin parlaklık değeri ile  $c_1$  ve  $c_2$  arasındaki mesafe bulunmaktadır. Algoritma 1'de 8 ve 9 numaralı satırlarda bulunan mesafe fonksiyonu ile bu işlem gerçekleştirilmektedir. *mesafe* fonksiyonuna ait kodlar ise Algoritma 2'de verilmiştir.

**Algoritma 1.** Modifiye edilmiş k-means kümeleme algoritması.

---

```

1.  $(c_1, c_2) \leftarrow (\text{random}(0,255), \text{random}(0,255));$  -- rastgele seçilmiş küme merkezleri
2.  $devam \leftarrow 1;$ 
3. while( $devam = 1$ ) loop
4.    $(c1\_toplam, c2\_toplam, c1toplam, c2toplam) \leftarrow 0;$ 
5.    $karşılaştır\_kmean \leftarrow segmentasyon;$ 
6.   for  $i$  in  $0$  to  $height-1$  loop
7.     for  $i$  in  $0$  to  $width-1$  loop
8.        $mesafe1 \leftarrow mesafe(af_i(i, j), c1);$ 
9.        $mesafe2 \leftarrow mesafe(af_i(i, j), c2);$ 
10.      if  $mesafe1 < mesafe2$  then
11.         $segmentasyon(i, j) \leftarrow 0;$ 
12.         $c1\_toplam := af_i(i, j) + c1\_toplam;$ 
13.         $c1toplam \leftarrow c1toplam + 1;$ 
14.      elsif  $mesafe1 > mesafe2$  then
15.         $segmentasyon(i, j) \leftarrow 1;$ 
16.         $c2\_toplam \leftarrow af_i(i, j) + c2\_toplam;$ 
17.         $c2toplam \leftarrow c2toplam + 1;$ 
18.      end if;
19.    end loop;
20.  end loop;
21.  if ( $karşılaştır\_kmean = segmentasyon$ ) then
22.     $devam \leftarrow 0;$ 
23.  end if;
24.   $c1 \leftarrow c1\_toplam / c1toplam;$ 
25.   $c2 \leftarrow c2\_toplam / c2toplam;$ 
26. end loop;

```

---

### c. Segmentasyonun yapılması ve kümelemelere ait veri toplamlarının bulunması

Bu adımda kümelere ait verilerin toplanması ve segmentasyon işlemi için gerekli hesaplamalar yapılmaktadır. Algoritma 1'de 10 ile 18. satırlar arasında bu süreç gerçekleştirilmektedir. Böylece segmentasyon değişkeninde segmente edilmiş resim tutulmaktadır.  $c1\_toplam$ 'da  $c_1$  kümesi,  $c2\_toplam$ 'da  $c_2$  kümesine ait verilerin toplamı,  $c1toplam$  ve  $c2toplam$  değişkenlerinde ise ilgili kümelerdeki eleman sayıları tutulmaktadır.

**Algoritma 2.** *mesafe* fonksiyonu.

---

```

1. function mesafe (constant  $A, B$ : real) return real is
2. begin
3.   return  $abs((A-B));$ 
4. end mesafe;

```

---

### d. İterasyonun durdurulması

Bu adımla, en ideal segmentasyon resmi elde edildiğinde iterasyonun durdurulması sağlanmaktadır. Algoritma 1'de 5. satırda  $karşılaştır\_kmean$  değişkeni segmentasyon değişkenine eşitlenmektedir. segmentasyon işleminden sonra *segmentasyon* resmi ile  $karşılaştır\_kmean$  değişkenleri eşitse iterasyonun durdurulması sağlanmaktadır. Bu işlem Algoritma 1'de 21 ve 23. satırlar arasındaki kodlarla gerçekleştirilmektedir.

### e. Küme merkezlerinin bulunması

$c1\_toplam$ ,  $c2\_toplam$  değişkenleri, sırasıyla  $c1toplam$ ,  $c2toplam$ 'a bölünmesiyle yeni küme merkezleri olan  $c_1$ ,  $c_2$  elde edilmektedir. Algoritma 1'de 24 ve 25. satırlarda bu işlem gerçekleştirilmektedir.  $c_1$ 'de elmaya ait küme merkezi bilgisi,  $c_2$ 'de ise arka plana ait küme merkezi bilgisi bulunmaktadır.

### 3.5. Elma genişliğinin ölçülmesi

Bu adımda piksel cinsinden elma genişliğini bulunmaktadır. Bu işlem için kullanılan kodlar, Algoritma 3'te verilmiştir. İlgili algoritmayla segmentasyon değişkeni kullanılarak en üst satırdan başlanarak en alt satıra kadar piksel

bazında resmin incelenmesi gerçekleştirilmektedir. İncelenen satırdaki elma genişliği satır\_genişlik değişkenine

**Algoritma 3.** Elmanın genişliğini elde etmek için kullanılan algoritmik süreç.

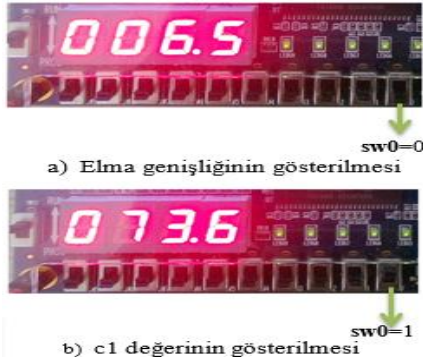
1.  $en\_uzun\_genişlik \leftarrow satır\_genişlik$ ;
2. *for i in 0 to height-1 loop*
3.  $satır\_genişlik \leftarrow 0$ ;
4. *for j in 0 to width-1 loop*
5. *if segmentasyon (i, j)=0 then*
6.  $satır\_genişlik \leftarrow satır\_genişlik + 1$ ;
7. *end if*;
8. *end loop*;
9. *if satır\\_genişlik > en\\_uzun\\_genişlik then*
10.  $en\_uzun\_genişlik \leftarrow satır\_genişlik$ ;
11. *end if*;
12. *end loop*

### 3.6. Sonuçların gösterilmesi

Önceki adımda elde edilen elma genişlik değeri piksel türünde olduğundan cm'ye çevrilmesi gerekmektedir. Önceden belirlenmiş olan kalibrasyon parametresi (KP) ile  $en\_uzun\_genişlik$  bölünerek cm cinsinden elma genişliğinin bulunması sağlanmaktadır:

$$elma\_genişliği = en\_uzun\_genişlik / KP \quad (3)$$

Şekil 6' da görülebildiği gibi, SW0 anahtarı 0 konumuna getirildiğinde FPGA kartındaki LCD ekranda  $elma\_genişliği$  değişken değeri, 1 konumuna getirildiğinde zaman c1 değeri gösterilmektedir. Toplam 100 adet elma için ayrıntısı yukarıda verilen segmentasyon süreci tekrarlanarak, bulunan c1 değerleri ile clstr dizisi elde edilmiştir

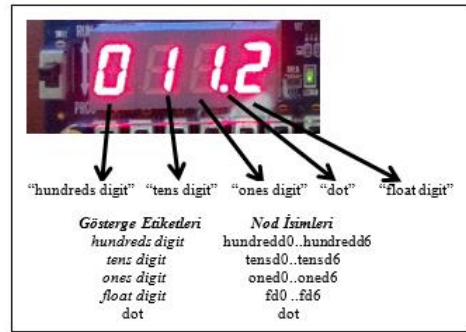


**Şekil 6.**  $elma\_genişliği$  ve c1 değişkenlerinin gösterilmesi

aktarılmaktadır. Elmanın en uzun genişlik değeri ise  $en\_uzun\_genişlik$  değişkenine aktarılmıştır.

### 3.7. Göstergelerin adreslenmesi

FPGA kartı üzerindeki LCD elemanı Şekil 7' de gösterildiği gibi, "hundreds digit", "tens digit", "dot", "ones digit" ve "float digit" olarak isimlendirilmiştir. Bu gösterge isimlerine karşılık gelen nod isimleri ve adreslemeleri Şekil 8' de verilmiştir.



**Şekil. 7** Gösterge etiketleri

Node Name	PCB layer	I/O Bank	Location	Direction	VREF Group
dot	7	PIN_B15	PIN_B15	Output	B7_N1
fd0	7	PIN_E11	PIN_E11	Output	B7_N1
fd1	7	PIN_F11	PIN_F11	Output	B7_N1
fd2	7	PIN_H12	PIN_H12	Output	B7_N1
fd3	7	PIN_H13	PIN_H13	Output	B7_N1
fd4	7	PIN_G12	PIN_G12	Output	B7_N1
fd5	7	PIN_F12	PIN_F12	Output	B7_N1
fd6	7	PIN_F13	PIN_F13	Output	B7_N1
hundredd0	7	PIN_B18	PIN_B18	Output	B7_N0
hundredd1	7	PIN_F15	PIN_F15	Output	B7_N0
hundredd2	7	PIN_A19	PIN_A19	Output	B7_N0
hundredd3	7	PIN_B19	PIN_B19	Output	B7_N0
hundredd4	7	PIN_C19	PIN_C19	Output	B7_N0
hundredd5	7	PIN_D19	PIN_D19	Output	B7_N0
hundredd6	7	PIN_G15	PIN_G15	Output	B7_N0
oned0	7	PIN_A13	PIN_A13	Output	B7_N1
oned1	7	PIN_B13	PIN_B13	Output	B7_N1
oned2	7	PIN_C13	PIN_C13	Output	B7_N1
oned3	7	PIN_A14	PIN_A14	Output	B7_N1
oned4	7	PIN_B14	PIN_B14	Output	B7_N1
oned5	7	PIN_E14	PIN_E14	Output	B7_N1
oned6	7	PIN_A15	PIN_A15	Output	B7_N1
reset1	7	PIN_A18	PIN_A18	Output	B7_N0
reset2	7	PIN_G16	PIN_G16	Output	B7_N0
reset3	7	PIN_D13	PIN_D13	Output	B7_N1
tensd0	7	PIN_D15	PIN_D15	Output	B7_N0
tensd1	7	PIN_A16	PIN_A16	Output	B7_N1
tensd2	7	PIN_B16	PIN_B16	Output	B7_N1
tensd3	7	PIN_E15	PIN_E15	Output	B7_N0
tensd4	7	PIN_A17	PIN_A17	Output	B7_N1
tensd5	7	PIN_B17	PIN_B17	Output	B7_N1
tensd6	7	PIN_F14	PIN_F14	Output	B7_N0

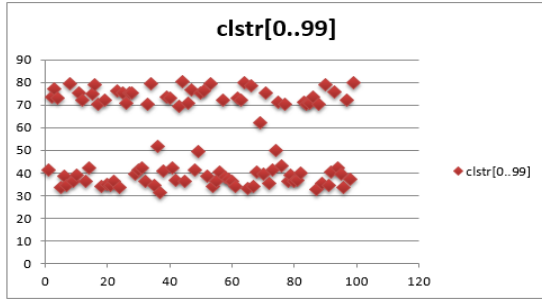
**Şekil. 8** Gösterge nodlarının adreslenmesi



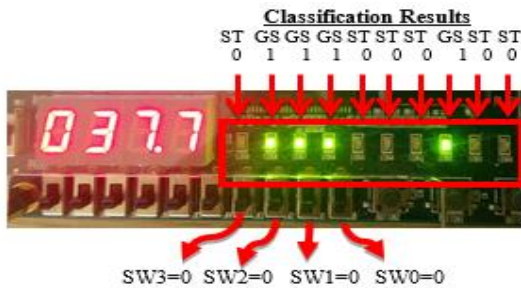
### 3.8. Sınıflandırma

Bu aşamada, elmaların sınıflandırması gerçekleştirilmektedir. Sınıflandırma işleminin başlangıcında küme sayısı 2'ye ayarlanmıştır. Bu işlemin ardından clstr dizisindeki verilerin K-means kümeleme algoritmasına bağlı olarak sınıflandırması gerçekleştirilmektedir. ST elmaya ait c1 düzeyi 33.8- 42.2 arasında olup, GS elmanın 70.1-79.4 arasındadır. clstr dizisinin grafiksel gösterimi Şekil 9' da verilmiştir.

Hazırlanan yazılımda clstr dizisinin K-means kümeleme yöntemi ile sınıflandırma sonucu clusteroutt değişkeninde tutulmuştur. Bu sınıflandırılma sonucunda, ST tür elmaların c1 değeri GS elmanınkinden daha düşük olduğu için GS tür elmalar 0 değeriyle, ST elmalar ise 1 ile temsil edilmektedir. Şekil 10' de görülen FPGA kartı üzerinde bulunan SW0, SW1, SW2 ve SW3 anahtarının pozisyonlarına bağlı olarak onlu gruplar halinde bu sınıflandırma sonuçları LED'lerde gösterilmektedir. clusteroutt için adresleme haritası Şekil 11' de verilmiştir. 100 adet elmada elde edilen clstr ve clusteroutt değerleriyle clstr ve clusteroutt dizileri elde edilmiştir.



Şekil. 9 K-means kümeleme sonuçları



Şekil. 10 FPGA kartı üzerinde sınıflandırma sonuçlarının gösterilmesi

Node Name	Direction	Location	I/O Bank	REF Group
clusteroutt[9]	Output	PIN_B1	1	B1_NO
clusteroutt[8]	Output	PIN_B2	1	B1_NO
clusteroutt[7]	Output	PIN_C2	1	B1_NO
clusteroutt[6]	Output	PIN_C1	1	B1_NO
clusteroutt[5]	Output	PIN_E1	1	B1_NO
clusteroutt[4]	Output	PIN_F2	1	B1_NO
clusteroutt[3]	Output	PIN_H1	1	B1_N1
clusteroutt[2]	Output	PIN_J3	1	B1_N1
clusteroutt[1]	Output	PIN_J2	1	B1_N1
clusteroutt[0]	Output	PIN_J1	1	B1_N1

Şekil. 11 clusteroutt için adresleme haritası

## 4. Deneysel Sonuçlar

Tasarlanan nesne tanıma ve ölçüm sisteminin performansını incelemek için farklı ölçülere sahip 50 adet ST, 50 adet GS tür elmalarla ait özellik çıkarım analizi ve sınıflandırma testi yapılmıştır.

### 4.1. Özellik çıkarımı analizi

Tasarlanan sistemin elma genişliği ölçüm başarımı bu test sürecinde gerçekleştirilmiştir. Bu test sürecinde aşağıda verilen denkleme bağlı olarak sistemin tespit ettiği ölçülen elma genişliği ve gerçek elma genişliği karşılaştırılarak mutlak hata bulunmaktadır:

$$\Delta m (\text{mutlak hata}) = |(\text{ölçülen elma\_genişliği}) - (\text{gerçek elma\_genişliği})| \quad (4)$$

İlk test işleminde Şekil 12.a'da görülen gerçek elma genişliği 7.42 cm olan ST tür elma kullanılmıştır. Test sonucunda sw0 anahtarı 0'a ayarlanarak ölçülen elma genişliği değeri 7.6 cm ve sw0 anahtarı 1'e ayarlanarak c1 değeri 41.3 olarak elde edilmiştir. Şekil 12' de bu sürecin görseli sunulmuştur.  $\Delta m$  değeri ise aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$\Delta m = |7.6 - 7.42| = 0.18 \text{ cm} \quad (5)$$

Yukarıda anlatılan test işlemlerine benzer şekilde 99 adet elma (GS ve ST türünden) üzerinde de benzer analizler gerçekleştirilmiştir. Test işlemi sonucunda oluşan  $\Delta m$  sonuçlarının istatistiksel analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 1' de sunulmuştur. İlgili tablodan 100 test' den elde edilen  $\Delta m$  sonuçlarının aritmetik ortalaması 0,209 olarak elde edilmiştir. Bu durum yüksek doğrulukta elma genişliğinin ölçüldüğünü göstermektedir. Deney numarasına

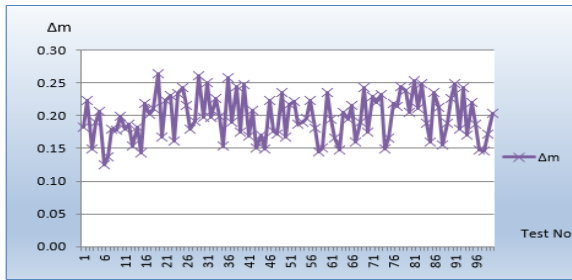
bağlı olarak elmaların  $\Delta m$  değişimi grafiği Şekil 13’ de verilmiştir. İlgili grafikten  $\Delta m$  sonuçlarının oldukça düşük düzeyde olduğu görülmektedir.



(a)

(b)  
sw0=0(c)  
sw0=1

Şekil 12. Analiz yapılan elma ve test sonuçları

Şekil 13. Elma genişlik ve  $\Delta m$  değişim grafiği

**Tablo 1.** GS tür elma analizinin istatistiksel analiz sonuçları

Δm için istatistiksel sonuçlar		
Maksimum	Aritmetik ortalama	Standart sapma
0,3	0,209	0,0413

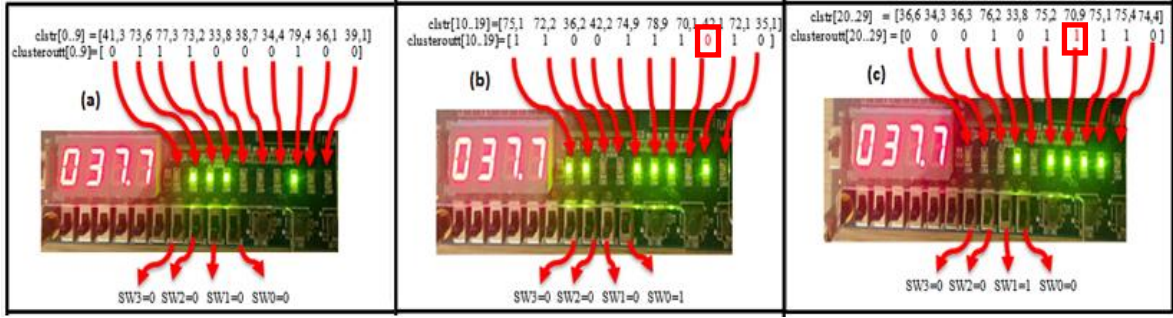
#### 4.2. Sınıflandırma analizi

Şekil 14. a’ da görüldüğü gibi, FPGA kartı üzerinde bulunan anahtarlar SW0 = 0, SW1 = 0, SW2 = 0 ve SW3 = 0 kombinasyonunda iken, ilk on elmanın sınıflandırma sonuçlarına bağlı olarak (clusteroutt[0..9]) FPGA kartındaki LED’lerde yanmaktadır. Bu sınıflandırma sonuçlarında hata olmadığından 100%’ lük bir başarı elde edilmiştir.

Şekil 14. b’ de görüldüğü gibi, FPGA kartı üzerinde bulunan anahtarlar SW0 = 0, SW1 = 0, SW2 = 0 ve SW3 = 1 kombinasyonunda iken, ikinci 10’ lu grup elmaların sınıflandırma sonuçlarına (clusteroutt[11..19]) bağımlı olarak FPGA kartındaki ledler yanmaktadır. Bu sınıflandırma sonuçlarında 1 adet hatalı sonuç oluştuğundan 90%’ lık bir başarı elde edilmiştir.

Şekil 14. c’ de görüldüğü gibi, FPGA kartı üzerinde bulunan anahtarlar SW0 = 0, SW1 = 0, SW2 = 1 ve SW3 = 0 kombinasyonunda iken, üçüncü 10’ lu grup elmaların sınıflandırma sonuçlarına (clusteroutt[21..29]) bağımlı olarak FPGA kartındaki ledler yanmaktadır. Bu sınıflandırma sonuçlarında da 1 adet hatalı sonuç oluştuğundan 90%’ lık bir başarı elde edilmiştir.

Yukarıda ayrıntılı olarak sunulan 30 elma testi sonucu Tablo 2’ de Test no. 1 ve Test no. 3 arasında sunulmuştur. Bu test işlemlerine ek olarak geriye kalan 70 adet elma için, SW0, SW1, SW2 ve SW3 anahtarlarının pozisyonlarına bağlı olarak elde edilen sınıflandırma sonuçları Test no. 31 ve Test no. 100 arasında sunulmuştur. Tabloda hatalı sınıflandırma sonuçları kırmızı renkli, altı çizgili ve italik olarak gösterilmiştir. Bu testlerin sonucunda, toplam 100 elma sınıflandırmasında % 94’ lük başarı oranı elde edilmiştir.



Şekil 14. SW3, SW2, SW1 ve SW0' ın pozisyonuna bağlı olarak sınıflandırma sonuçlarının gösterilmesi

Tablo 2. Test sonuçları

Anahtarların konumları ve Test Numaraları	Results
<i>Test no 1-10</i>	<i>clstr[0..9] değerleri ve clusterout[0..9] sonuçları</i>
SW0=0 SW1=0 SW2=0 SW3=0	41.3 73.6 77.3 73.2 33.8 38.7 34.4 79.4 36.1 39.1 0 1 1 1 0 0 0 1 0 0
<i>Test no 11-20</i>	<i>clstr[10..19] değerleri ve clusterout[10..19] sonuçları</i>
SW0=0 SW1=0 SW2=0 SW3=1	75.1 72.2 36.2 42.2 74.9 78.9 70.1 <u>42.1</u> 72.1 35.1 1 1 0 0 1 1 1 <u>0</u> 1 0
<i>Test no 21-30</i>	<i>clstr[20..29] değerleri ve clusterout[20..29] sonuçları</i>
SW0=0 SW1=0 SW2=1 SW3=0	36.6 34.3 36.3 76.2 33.8 75.2 <u>70.9</u> 75.1 75.4 74.4 0 0 0 1 0 1 <u>1</u> 1 1 1
<i>Test no 31-40</i>	<i>clstr[30..39] değerleri ve clusterout[30..39] sonuçları</i>
SW0=0 SW1=0 SW2=1 SW3=1	71.4 42.1 36.5 <u>61.4</u> 79.2 34.5 40.6 35.4 40.9 73.4 1 0 0 <u>1</u> 1 0 0 0 0 1
<i>Test no 41-50</i>	<i>clstr[40..49] değerleri ve clusterout[40..49] sonuçları</i>
SW0=0 SW1=1 SW2=0 SW3=0	73.2 42.1 36.9 76.3 70.4 36.3 <u>65.6</u> 76.5 71.5 70.3 1 0 0 1 1 0 <u>1</u> 1 1 1
<i>Test no 51-60</i>	<i>clstr[50..59] değerleri ve clusterout[50..59] sonuçları</i>
SW0=0 SW1=1 SW2=0 SW3=1	75.2 76.4 38.7 78.6 33.9 36.3 40.5 72.1 38.3 37.3 1 1 0 1 0 0 0 1 0 0
<i>Test no 61-70</i>	<i>clstr[60..69] değerleri ve clusterout[60..69] sonuçları</i>
SW0=0 SW1=1 SW2=1 SW3=0	36.2 34.1 73.2 72.1 73.8 71.1 78.5 34.0 70.2 <u>71.5</u> 0 0 1 1 1 0 1 0 1 <u>1</u>
<i>Test no 71-80</i>	<i>clstr[70..79] değerleri ve clusterout[70..79] sonuçları</i>
SW0=0 SW1=1 SW2=1 SW3=1	39.6 75.2 35.2 41.2 <u>46.9</u> 71.4 40.2 70.1 36.1 39.1 0 1 0 0 <u>0</u> 1 0 1 0 0
<i>Test no 81-90</i>	<i>clstr[80..89] değerleri ve clusterout[80..89] sonuçları</i>
SW0=1 SW1=0 SW2=0 SW3=0	36.4 36.7 40.1 71.4 70.5 73.6 73.7 36.5 70.4 35.4 0 0 0 1 1 1 1 0 1 0
<i>Test no 91-100</i>	<i>clstr[90..99] değerleri ve clusterout[90..99] sonuçları</i>
SW0=1 SW1=0 SW2=0 SW3=1	79.1 74.6 40.3 75.6 42.1 39.6 37.7 72.1 77.3 76.1 1 1 0 1 0 0 0 1 1 1

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada gıda sektöründe ihtiyaç duyulan bir sınıflandırma sisteminin mobil düzeyde tasarımının yapılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, GS ve ST tür elmaların genişliklerini ölçen ve renge bağlı olarak elmaları sınıflandıran mobil bir FPGA donanımı geliştirilmiştir. Başlangıçta kameradan gerçek zamanlı olarak görüntü alınmasının ardından bu görüntü gri düzeye çevrilmiştir. Ardından k-means kümeleme yöntemiyle görüntünün segmentasyonu yapılmıştır. Çalışmamızda segmentasyon başarısını arttırmak için K-means metodu modifiyeler içerecek şekilde VHDL dilinde yazılmıştır. Bu işlemin ardından K-means kümeleme yöntemiyle elmaların sınıflandırması yapılmıştır. Kümeleme sonucu LED'lerde ve elma genişlik değeri ise FPGA göstergesinde gösterilmiştir. Yapılan test çalışmaları sonucunda % 94 başarı oranı ile elmaların sınıflandırıldığı ve düşük mutlak hatayla elma genişliğinin ölçüldüğünü göstermiştir.

## 6. Kaynaklar

1. Volnei A. (2004). Pedroni, Circuit Design with VHDL. Massachusetts Institute of Technology, London, England.
2. Hauck, S., DeHon, A. (2008). Reconfigurable Computing: The Theory and Practice of FPGA-Based Computation. Elsevier Inc, Burlington.
3. Rochaa, A., Hauaggeb, D. C., Wainera, J., Goldensteina, S. (2010). Automatic fruit and vegetable classification from images. *Computers and Electronics in Agriculture*, **70(1)**: 96–104.
4. Baranowski, P., Mazurek, W., Pastuszka-Woźniak, J. (2013). Supervised classification of bruised apples with respect to the time after bruising on the basis of hyperspectral imaging data. *Postharvest Biology and Technology*, **86**: 249–258.
5. Mizushima, A., Lub, R. (2013). An image segmentation method for apple sorting and grading using support vector machine and Otsu's method. *Computers and Electronics in Agriculture*, **94**: 29–37.
6. Unay, D., Gosselin, B. (2007). Stem and calyx recognition on 'Jonagold' apples by pattern recognition. *Journal of Food Engineering*, **78(2)**:597 – 605.
7. Dubey, S. R., Jalal, A. S. (2016). Apple disease classification using color, texture and shape features from images. *Signal, Image and Video Processing*, **10(5)**: 819–826, 2016
8. Naik, S., Patel, B. (2017). Machine vision based fruit classification and grading - a review. *International Journal of Computer Applications*, **170(9)**: 1-13.
9. Dara, F., Devolli, A. (2016). Applying artificial neural networks (ANN) techniques to automated visual apple sorting. *Journal of Hygienic Engineering and Design*, **17**: 55-63.
10. Jamdar, A. V., Patil, A. P. (2017). Detection and classification of apple fruit diseases using K-means clustering and learning vector quantization neural network. *IJSDR*, **2(6)**: 423-429.
11. Pearson, T. (2009). Hardware-based image processing for high-speed inspection of grains. *Computers and Electronics in Agriculture*, **69**: 12–18
12. Nuño-Maganda, M. A., Hernandez-Mier, Y., Torres-Huitzil, C., Jim'enez-Arteaga, J. (2014). FPGA-based real-time citrus classification system. *2014 IEEE 5th Latin American Symposium*, 25-28 Feb. 2014, Santiago, Chile.
13. Ibarra-Manzano, M.-A., Devy, M., Boizard, J.-L. (2010). Real-Time classification based on color and texture attributes on an FPGA-based architecture. *Design and Architectures for Signal and Image Processing (DASIP)*, 26-28 October 2010, Edinburgh, UK.
14. Saegusa, T., Maruyama, T. (2007). Real-time segmentation of color images based on the K-Means clustering on FPGA, Field-Programmable Technology. *ICFPT 2007 International Conference*, 12-14 December 2007, Kitakyushu, Japan.
15. Avci, E., Turkoglu, İ., Poyraz, M. (2005). Intelligent target recognition based on wavelet packet neural network, *expert systems with applications*, **29**: 175–182.
16. Rafael, C. G., Woods, R. E. (2002). Digital Image Processing. *Prentice Hall, U.S.A.*
17. Sert, E. and Okumuş, İ. T. (2014). Segmentation of mushroom and cap width measurement using modified K-means clustering algorithm. *Advances in Electrical and Electronic Engineering Journal*, **12(4)**: 354-360. 2014.

## **Dolgu Duvarların Modellenme Yaklaşımlarının Betonarme Çerçeve Davranışına Etkisi**

**Sibel SAĞLIYAN**

*Fırat Üniversitesi Teknik Bilimler MYO, 23119, Elazığ*  
ssagliyan@firat.edu.tr

**(Geliş/Received: 27.02.2018; Kabul/Accepted: 11.07.2018)**

### **Özet**

Betonarme taşıyıcı sisteme sahip yapılar tasarlanırken dolgu duvarların etkisi çoğunlukla hesaba katılmamaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda dolgu duvarların betonarme binaların davranışı üzerinde önemli etkilere neden olduğu vurgulanmıştır. Yatay yüklerin etkisi altında betonarme düzlem çerçeve üzerinde dolgu duvarların etkisini incelemek amacıyla dolgu duvarlar eşdeğer sanal basınç çubuğu ile modellenmiştir. Elde edilen taban kesme ve kolon kesme kuvvetleri, görelî kat ötelenmesi ve periyotlar yapılan değerlendirmelerde temel kriterler olarak ele alınmıştır. Bu amaçla 5, 9 ve 12 katlı, Z1 ve Z3 zemin sınıflarında dolgu duvarlı düzlem çerçeveler tasarlanmıştır. Düzlem çerçevelerdeki dolgu duvarlar iki farklı yaklaşımla eşdeğer basınç çubuğu olarak modellenerek dolgu duvarların etkisi irdelenmiştir. Dolgu duvarların eşdeğer basınç çubuğu ile modellemede DBYBHY-2007 ve Hendry tarafında önerilen yaklaşımlar kullanılmıştır. Çalışma sonucunda dolgu duvarların yapının rijitliğini değiştirdiği dolayısıyla periyot, görelî kat ötelenmesi ve kolonlara gelen kesme kuvvetini azalttığı, taban kesme kuvvetini ise arttırdığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dolgu duvar, Eşdeğer basınç çubuğu, Görelî kat ötelenme oranı, Taban kesme kuvveti, Kolon kesme kuvveti, Zemin sınıfı

## **Effect of Modeling Approaches of Infill Walls on Reinforced Concrete Frame Behavior**

### **Abstract**

The effect of infill walls is mostly not taken into account when designing constructions with reinforced concrete system. It has been emphasized that infill walls in reinforced concrete buildings have significant effects on the behavior of reinforced concrete buildings in the literature. In order to investigate the effect of walls on reinforced concrete frame under the influence of horizontal loads, infill walls were modeled with equivalent virtual compression strut. Basis shear and column shear forces, interstory drift and periods are considered as basic criteria in evaluations. For this purpose, plane frames were designed in 5, 9 and 12 floors in Z1 and Z3 local site classes. Infall walls in plane frames were modeled as pressure strut equivalent with two different approaches and the effect of infall walls is investigated. Approaches suggested by FEMA-306 and Hendry were used in modeling with equivalent pressure strut of infall walls. As a result of this study, it was determined that the infall walls changed the stiffness of the structure, thus reducing the shear force applied to the column, interstory drift and natural periods and increasing the shear force.

**Key Words:** Infall wall, Equivalent compression strut, Interstory drift rate, Base shear force, Column shear force, Local site class

### **1. Giriş**

Betonarme taşıyıcı sisteme sahip binalarda bölme duvar olarak tuğla dolgunun kullanılması ülkemizde çok yaygındır. Betonarme yapıların davranışlarını belirlemek için yapılan analiz ve tasarımlarında çerçeveler arasında yer alan dolgu duvarlar birçok bilinmeyeninin olması nedeniyle

hesaba katılmayıp etkisi çoğunlukla göz ardı edilmektedir. Ülkemizde ve diğer bazı ülkelerde yürürlükte olan mevcut deprem yönetmeliklerinin hemen hemen hepsinde dolgu duvar panellerinin, yapının taşıyıcı sistemi üzerindeki etkileri ihmal edilmiş ve dayanım ve rijitliğe olan katkıları yedek kapasite olarak dikkate alınmıştır. İlk bakışta korunumlu bir

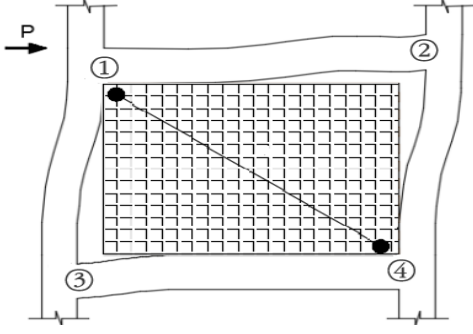
yaklaşım olarak görünse de makul değildir. Deprem sırasında bu rijitlik artışı yapının taban kesme kuvveti istemini yükseltebilmekte ve yapıya daha büyük deprem kuvvetlerinin etkimesine neden olabilmektedir. Dolgu duvarlarda oluşan hasarlar, deprem enerjisinin sönümlenmesi anlamına gelir ki bu da dolgu duvarların analitik modellerde hesaba katılmasını gerektirir. Yapılan literatür çalışmasında dolgu duvarların betonarme binaların deprem davranışına etkisinin ortaya konduğu çokça çalışma olduğu görülmüştür. Taşlıgedik ve diğ. [1]'nin dolgu duvarların betonarme binaların deprem performansı üzerindeki etkisini incelendikleri çalışmada, taşıyıcı sistemde göz ardı edilen dolgu duvarların önemli etkilere neden olduğunu vurgulamışlardır. Yakut ve diğ. [2] dolgu duvarların betonarme binaların dayanım ve rijitliğine etkisini, incelenen doğrultudaki toplam dolgu duvar alanının bina toplam kat alanına oranına bağlı olarak incelemişlerdir. Dolgu duvarların betonarme binaların dayanım ve rijitliğini dolgu duvar alanı oranına bağlı olarak önemli ölçüde değiştirdiğini belirtmişlerdir. Calvi ve diğ. [3] yaptıkları çalışmada yer sarsıntısının başlarında dolgu panellerin çatlayıp çerçeveden ayrıldığı için davranışa etkilerinin ihmal edilmesi gerektiği görüşünün çürütüldüğünü ve birçok vakada enerjinin büyük bölümünün dolgu duvarlarda sönümlenip kiriş ve kolonlarda sönümlenmenin düşük kaldığını belirlemişlerdir. Zarnic ve Tomazevic [4] çalışmalarında, ya dolgu duvarlar ikinci derece yapı elemanı olarak kabul edilmeli ve yeterli miktarda derzler ile sistemden ayrılmalı ya da yapının önemli parçaları olarak inşa edilerek, hesap aşamasında dolgu duvarlar ile çerçeveler arasındaki etkileşimi dikkate alacak yaklaşımlarla göz önüne alınması gerektiğini ifade etmişlerdir. 2011 yılında meydana gelen Van-Edremit depremi sonucunda yayınlanan raporda boşluklu tuğla ile yapılan dolgu duvarlı yapılarda katlar arası ötelenme oranının yaklaşık %0.5 - %0.7 seviyelerini aşması durumunda bölme duvarlar ezildiği ve/veya düzlemi dışına devrildiği, bunun sonucu olarak yapısal sistemde gözlemlenen hasarların arttığı belirtilmiştir [5]. Dolgu duvarların yapı taşıyıcı sisteme dahil edilmesinde eşdeğer sanal çubuk ile modellenmesi üzerinde yapılan çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda dolgu

duvarların eşdeğer sanal basınç çubukları ile modellenmesinde farklı yaklaşımlar ortaya konmuştur [6,7,8]. Dolgu duvarların eşdeğer sanal basınç çubuğu ile modellenmesindeki bu farklı yaklaşımları Tar [9] dolgu duvarlı düzlem ve üç boyutlu çevrelerden oluşan yapı modellerinde ele alarak, yapı modellerinin periyot ve görelî kat ötelenmelerini doğrusal elastik yöntemle incelemiştir. Aynı çalışmada bu yapıların doğrusal olmayan davranışları da statik itme analizi ile incelenmiş ve kapasite eğrileri verilmiştir. Boşluklu tuğla duvarların eşdeğer basınç çubuğu ile modellendiği analitik çözümlerinin sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılan bir başka çalışmada hata payının düşük olduğu bildirilmiştir[10].

Yapılan literatür çalışmaları ışığında, bu çalışmada düzlem çerçevelerde dolgu duvarlar iki farklı yaklaşımla eşdeğer sanal basınç çubuğu ile modellenerek elde edilen modellerin katsayıları ve zemin sınıfı değiştirilerek periyot, kat yerdeğiştirme, görelî kat ötelenmesi, kolon kesme ve taban kesme kuvvetinin değişimi incelenmiştir.

### 1.1. Eşdeğer basınç çubuğu (EBC) ile modelleme

Bu modellemede, betonarme çerçeve içindeki dolgu duvarın kat hizalarına tesir eden yatay kuvvetler altında, kuvvetin tesir ettiği düğüm noktası ile diyagonaldeki düğüm noktası arasında bir basınç çubuğu gibi davrandığı varsayılmaktadır. Yatay yük etkisi altında kalan çerçeve Şekil 1'deki gibi deforme olacağından dolgu duvarın çerçeve ile olan bağlantısı 2 ve 3 numaralı köşelerde kesilecektir. Duvar üzerindeki yük aktarımı temas halinde bulunan 1 ve 4 numaralı noktalar arasında gerçekleşecektir. Modellemede eşdeğer basınç çubuğunun kalınlığı ve elastisite modülü dolgu duvarın kalınlığı ve elastisite modülü ile aynı alınmaktadır. Bu çalışmada dolgu duvarların modellenmesinde kullanılacak eşdeğer sanal basınç çubuğunun genişliğinin hesabında iki ayrı yaklaşım göz önüne alınacaktır.



Şekil 1. Yatay yük etkisi altında deforme olmuş bir çerçeve ve eşdeğer basınç çubuğu

a) Birinci yaklaşımda dolgu duvarın genişliğinin belirlenmesinde FEMA [11] ve Türk Deprem Yönetmeliği-2007 [12]'de verilen denklem (1)-(2) kullanılacaktır.

$$a_{duvar} = 0,175(\lambda_{duvar} h_k)^{-0,4} r_{duvar} \quad (1)$$

$$\lambda_{duvar} = \left[ \frac{E_{duvar} t_{duvar} \sin 2\theta}{4E_c I_k h_{duvar}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1}(h_{duvar}/l_{duvar}) \quad (3)$$

b) İkinci yaklaşımda ise kirişlerin, kolonların ve dolgu duvarın göreceli rijitliklerine göre belirlenen  $\alpha_h$  ve  $\alpha_L$  (4,5) [13] kullanılarak eşitlik (6) kullanılacaktır [9].

$$\alpha_h = \frac{\pi^4}{2} \sqrt{\frac{4E_c I_k h}{E_{duvar} t_{duvar} \sin 2\theta}} \quad (4)$$

$$\alpha_L = \pi^4 \sqrt{\frac{4E_c I_b h}{E_{duvar} t_{duvar} \sin 2\theta}} \quad (5)$$

$$\frac{w}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\alpha_h^2 + \alpha_L^2} \quad (6)$$

Eşdeğer sanal basınç çubuğunun genişliğini veren eşitliklerde,  $E_{duvar}$  ve  $E_c$  dolgu duvar ve çerçeve malzemesinin elastisite modülünü,  $t_{duvar}$ ,  $h_{duvar}$ ,  $r_{duvar}$ , sırasıyla dolgu duvarın kalınlığını, yüksekliğini, köşegen uzunluğunu,  $\theta$  eşdeğer basınç çubuğunun yatayla yaptığı açığı,  $\lambda_{duvar}$  eşdeğer basınç çubuğu katsayısını,  $a_{duvar}$  ( $=w/2$ ) ise eşdeğer basınç çubuğunun genişliğini ifade etmektedir. Yine  $h_k$  giriş orta eksenleri arasında kalan kolon yüksekliğini,  $I_k$  ise kolonun atalet momentini ifade etmektedir.

## 2. Sayısal Uygulama

Dolgu duvarların taşıyıcı sisteme dahil edilmesinin yapısal davranışa etkisini incelemek amacıyla yapılan bu çalışmada, dolgu duvarların eşdeğer sanal basınç çubuğu ile modellenmesinde iki farklı yaklaşım kullanılmıştır. Modelleme yöntemlerinin etkisini incelemek amacıyla 3 açıklıklı 5, 9 ve 12 katlı düzlem çerçeveler göz önüne alınmıştır. Düzlem çerçevelerin isimlendirilmesi, dolgu duvarların sadece dış yük olarak kabul edildiği model çerçeveler Z1 ve Z3 zemin sınıflarında katsayısına göre Ç 5-Z1, Ç 5-Z3, Ç 9-Z1, Ç 9-Z3, Ç 12-Z1, Ç 12-Z3 biçiminde isimlendirilmiştir. Benzer şekilde dolgu duvarların FEMA (BÇ1) ve Hendry'e (BÇ2) göre düzenlenmiş eşdeğer sanal basınç çubukları ile modellendiği çerçeveler ise BÇ1 5-Z1, BÇ1 5-Z3, BÇ2 5-Z1, BÇ2 5-Z3, BÇ1 9-Z1, BÇ1 9-Z3, BÇ2 9-Z1, BÇ2 9-Z3, BÇ1 12-Z1, BÇ1 12-Z3, BÇ2 12-Z1, BÇ2 12-Z3 olarak isimlendirilmiştir.

Model düzlem çerçeveler Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik [12] ve TS500 [14] koşullarını sağlayacak şekilde boyutlandırılmıştır. Ele alınan bu çerçevelerde giriş kesitleri 30x60 cm, kolon kesitlerinin ise 5 katlı çerçevede 50x50 cm, 9 katlı çerçevede 60x60 cm son dört katta 50x50 cm, 12 katlı çerçevede ise her dört katta değiştirilmek suretiyle 65x65 cm, 55x55 cm ve 45x45 cm olarak belirlenmiştir. Bu düzlem çerçevelerin bir konut yapısının kenar aksından çıkartıldığı kabul edilmiş ve düşey yükler üç boyutlu yapı üzerinden hesaplanarak çerçevelere paylaştırılmıştır. Çerçevelerin modal kütleleri ölü yükler ile hareketli yüklerin %30'unun toplamından hesaplanmıştır. Çerçevelerin analizleri doğrusal elastik deprem hesabı Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi [12] kullanılarak yapılmıştır. Beton sınıfı C25 olarak kabul edilmiştir. Düzlem çerçevelerin eşdeğer deprem yükü yöntemi ile analizleri SAP 2000[15] yapısal analiz programı ile yapılmıştır. Boyutlandırılmada kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

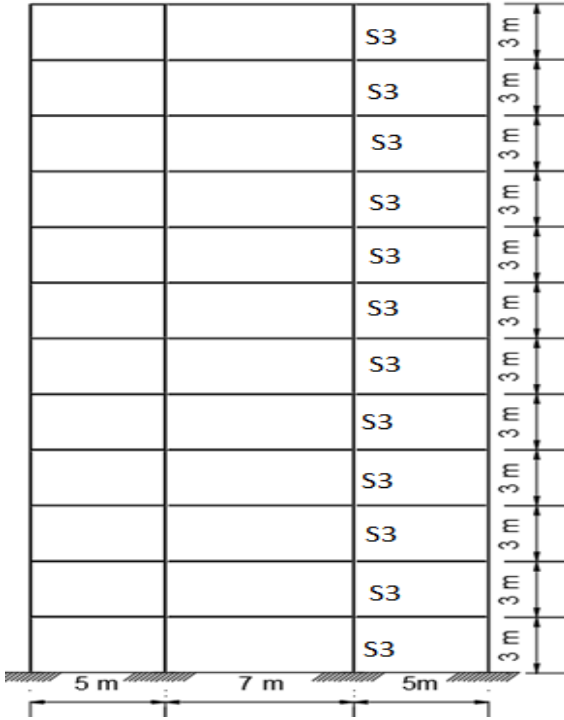
**Tablo 1.** Boyutlandırılma ve analiz esnasında alınan bazı parametreler

Deprem Bölgesi	1	
Etkin yer ivmesi katsayısı ( $A_0$ )	0.4	
Bina önem katsayısı	1	
Yerel zemin sınıfları ve Spektrum karakteristik periyotları	1	$T_A=0.10$ $T_B=0.30$
	3	$T_A=0.15$ $T_B=0.60$
Taşıyıcı sistem davranış katsayısı	8	
Hareketli yük katılım katsayısı ( $n$ )	0.30	

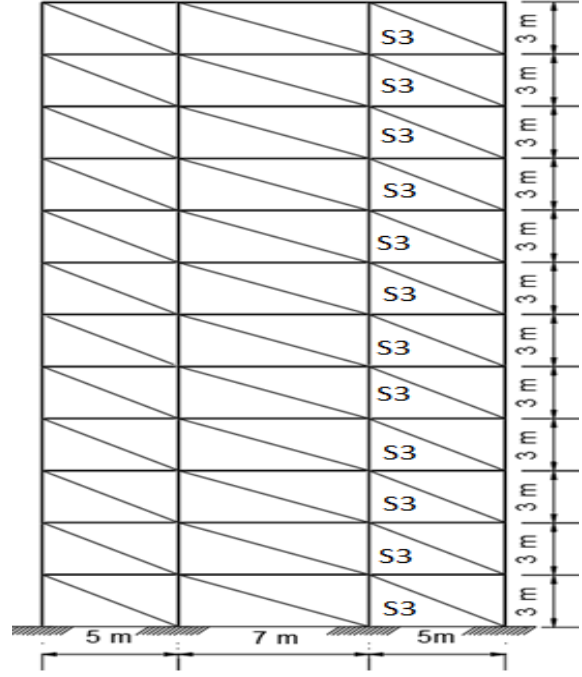
Kalınlıkları  $t_{duvar}=19$  cm olan tuğla dolgu duvarların tüm açıklıklarda herhangi bir boşluk içermediği kabul edilerek göz önüne alınmıştır. Dolgu duvar elastisite modülü 1000 MPa olarak kabul edilmiştir. Eşdeğer sanal basınç çubuklarına ait parametreler Tablo 2’de, çalışmada ele alınan düzlem çerçeve modeller ise Şekil 2- 7’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Eşdeğer basınç çubuklarına ait parametreler

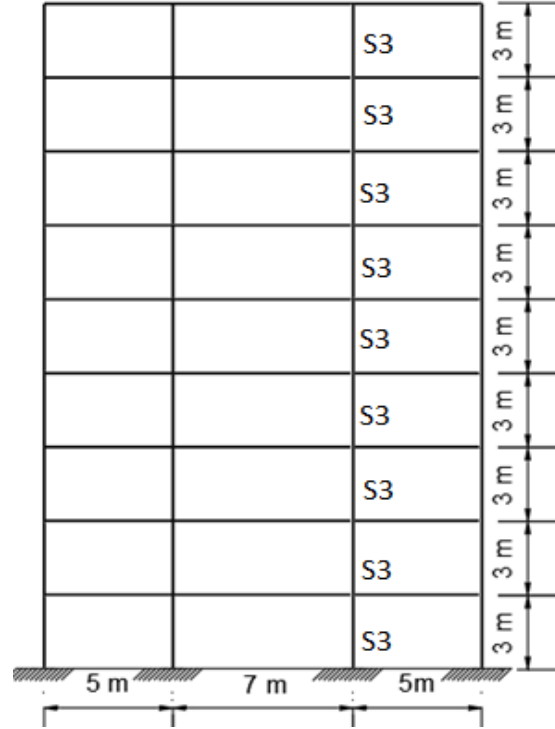
Açıklık (m)	$h_{duvar}$ (cm)	$L_{duvar}$ (cm)	$t_{duvar}$ (cm)	$r_{duvar}$ (cm)	$\beta_{duvar}$ (cm) = $w/2$	
5	240	450	20	510	72	305
7	240	650	20	693	100	327



**Şekil 2.** Model Ç 12

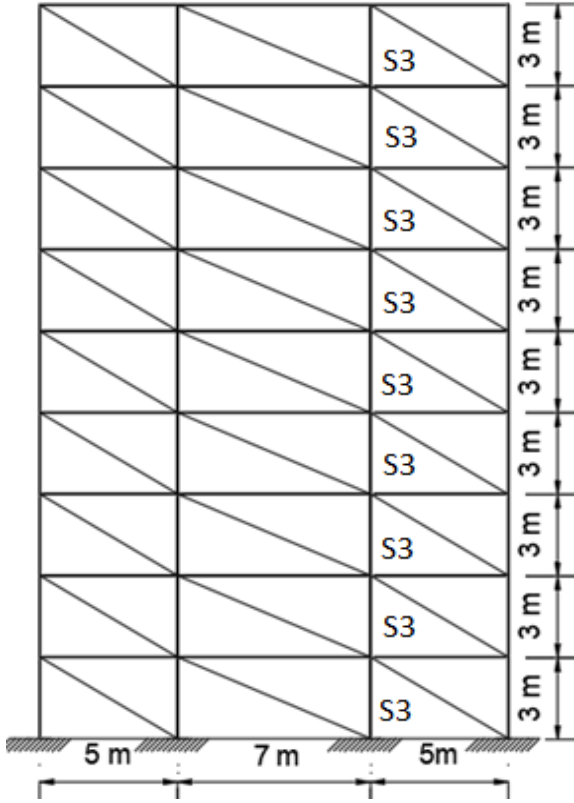


**Şekil 3.** Model BÇ1 12 ve Model BÇ2 12

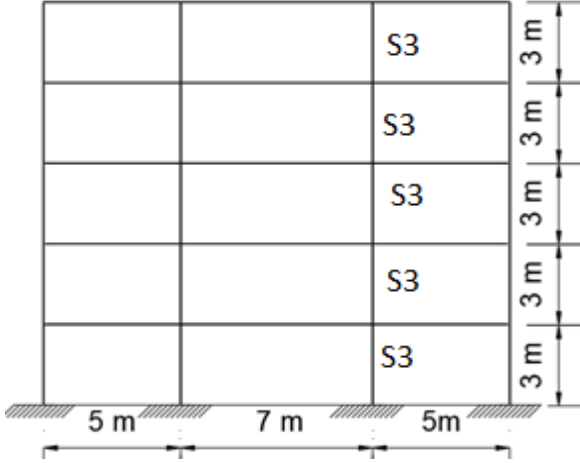


**Şekil 4.** Model Ç 9

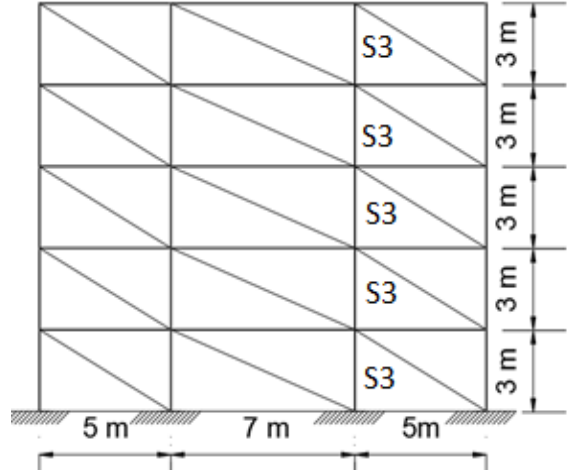




Şekil 5. Model BÇ1 9 ve Model BÇ2 9



Şekil 6. Model Ç 5

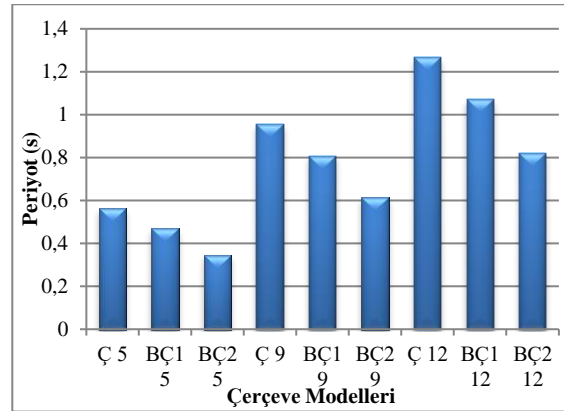


Şekil 7. Model BÇ1 5 ve Model BÇ2 5

### 3. Bulgular ve Tartışma

Düzlem çerçevelerde dolgu duvarların modellenmeye dahil edilmesi durumunda iki farklı yaklaşımla modellenen dolgu duvarların yapısal davranışa etkisi Z1 ve Z3 zemin sınıflarında incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Model düzlem çerçevelerin modal analizinden doğal titreşim moduna ait periyot değerleri Şekil 8'de verilmiştir. Model çerçevelerin periyot değerlerinin kat sayısına bağlı olarak arttığı belirlenmiştir.



Şekil 8. Model çerçevelerin 1. doğal titreşim periyotları

BÇ1 ve BÇ2 modellerine ait çerçevelerin 1. doğal periyotlarının, Ç modelinin 1. doğal periyotuna göre değişimleri Tablo 3'de

verilmiştir. BÇ1 modelinde elde edilen 1. doğal periyot Ç modelindeki periyota göre yaklaşık % 16, BÇ2 modelinin ise %35 daha küçük olduğu belirlenmiştir. Kat sayısı artışının dolgu duvarlı modellere göre değişim yüzdesinde fazla bir değişikliği neden olmadığı belirlenmiştir.

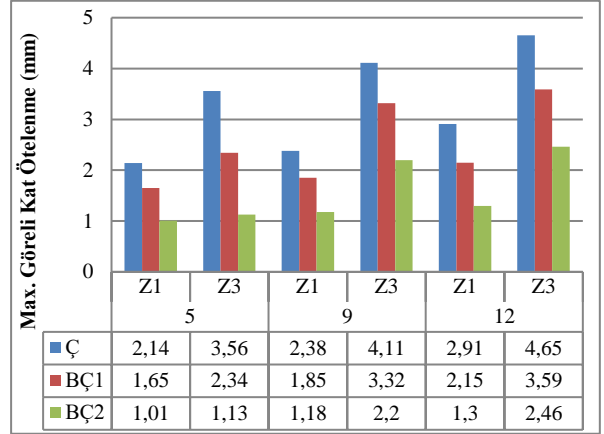
**Tablo 3.** Model çerçevelerin 1.doğal titreşim periyodu ve dolgu duvarlı modellere göre periyot azalma yüzdeleri

Modeller	Periyot (s)	Değişim(%)
Ç 5	0.564	
BÇ1 5	0.469	16.84
BÇ2 5	0.346	38.65
Ç 9	0.954	
BÇ1 9	0.808	15.30
BÇ2 9	0.614	35.54
Ç 12	1.267	
BÇ1 12	1.072	15.39
BÇ2 12	0.821	35.20

- Model düzlem çerçevelerin düşey yükler ve deprem yükleri etkisi altında hesaplanan kat yatay yer değiştirmelerinden elde edilen maksimum tepe yer değiştirmeleri Tablo 4’de, maksimum görelî kat ötelenme değerleri ise Şekil 9’da verilmiştir. Her iki zemin sınıfında, dolgu duvarların taşıyıcı sisteme dahil edilmesi durumunda yapı daha rijit davrandığı için max. tepe yer değiştirme ve görelî kat ötelenme değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

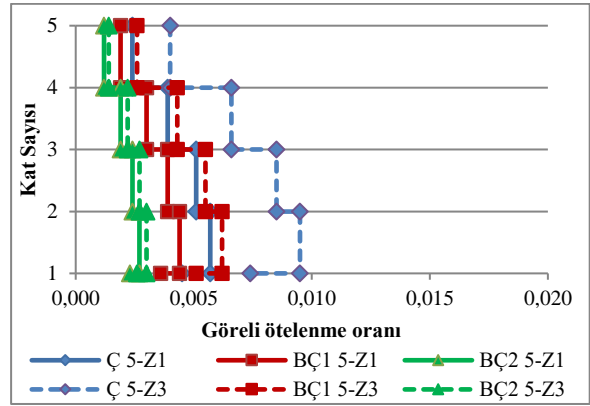
**Tablo 4.** Model düzlem çerçevelerde tepe yerdeğiştirme azalma oranları

Kat Sayısı	Model Düzlem Çerçeveler	Z1		Z3	
		Max. Tepe Yer değiştirme (mm)	Max. Tepe Yer değiştirme Yüzdesi	Max. Tepe Yer değiştirme	Max. Tepe Yer değiştirme Yüzdesi
5	Ç	8.12	0	13.53	0
	BÇ1	6.27	22.8	8.91	34.1
	BÇ2	3.96	51.2	4.46	67.0
9	Ç	16.27	0	28.95	0
	BÇ1	12.9	20.7	23.18	19.9
	BÇ2	8.44	48.1	15.73	45.7
12	Ç	27.19	0	43.51	0
	BÇ1	20.17	25.8	33.61	22.8
	BÇ2	12.71	53.2	23.97	44.9

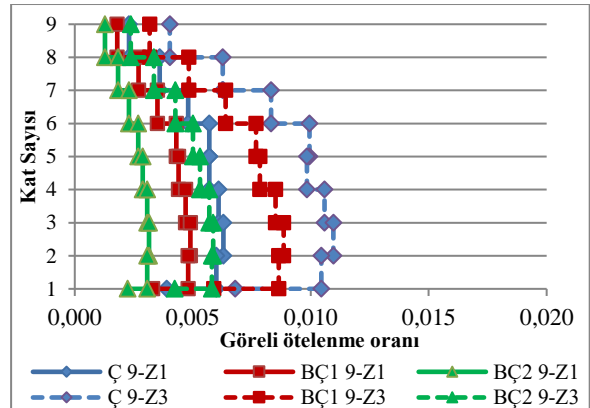


**Şekil 9.** Model düzlem çerçevelerde kat sayısına ve zemin sınıfına göre max. görelî kat ötelenme değerleri

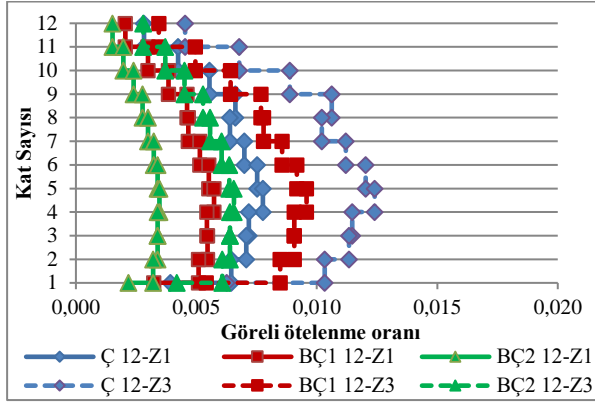
Model düzlem çerçevelerde kat seviyesinde elde edilen görelî ötelenme oranları Şekil 11-13’de gösterilmiştir.



**Şekil 11.** Katlı model çerçevelerde görelî kat ötelenme oranları



**Şekil 12.** Katlı model çerçevelerde görelî kat öteleme oranları



Şekil 13. Katlı model çerçevelerde görelî kat ötelenme oranları

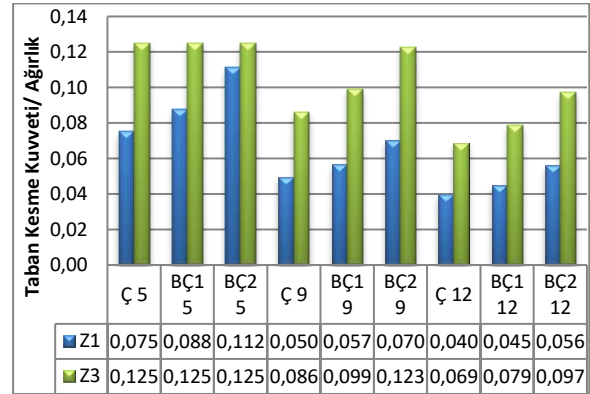
Görelî kat öteleme oranları Ç modellerinde büyük iken sırasıyla BÇ1 ve BÇ2 modellerinde bu oranın azaldığı belirlenmiştir. Z1 zemin sınıfında görelî kat ötelenme oranları küçükken Z3 zemin sınıfında ise daha büyüktür. Z1 zemin sınıfında 5 ve 9 katlı çerçevelerde dolgu duvarların dikkate alınmadığı model çerçevede literatürde [5] 0,005-0,007 olarak ifade edilen hasar sınırı aşılmıştır. 12 katlı çerçevelerde ise BÇ2 modeller hariç diğer tüm modellerde bu hasar sınırı aşılmıştır. Z3 zemin sınıfında ise sadece 5 katlı çerçevelerde BÇ2 model çerçevelerde hasar sınırı aşılmamış, 9 ve 12 katlı tüm model çerçevelerde bu hasar sınırı aşılmıştır. Ayrıca tüm model çerçevelerde DBYBHY [12]'de verilen görelî kat ötelenme oran sınırı olan 0,02 değerinin aşılmadığı belirlenmiştir.

Model çerçevelerde elde edilen maksimum görelî kat ötelenme oranları ise Tablo 5'de verilmiştir. Zemin sınıfı değişimi ve katsayısı artışının görelî kat ötelenme oranlarını arttırdığı görülmüştür. Dolgu duvarlı modellerin dolgu duvarsız modeller oranları incelendiğinde ise 5 katlı yapı da Z3 zemin sınıfındaki değerlerin Z1 zemin sınıfına göre biraz daha büyük, fakat 9 ve 12 katlı yapılarda ise daha küçük olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5. Model düzlem çerçevelerde max.görelî kat ötelenme oranları ve dolgu duvarsız modele göre yüzde değişimi

Kat Sayısı	Model Düzlem Çerçeveler	Z1		Z3	
		Max.Görelî Kat Öte. Oran	Max.Görelî Kat Öte. Yüzdesi	Max.Görelî Kat Öte. Oran	Max.Görelî Kat Öte. Yüzdesi
5	Ç	0,0057	0	0,0095	0
	BÇ1	0,0044	22.8	0,0062	34.7
	BÇ2	0,0027	52.6	0,0030	68.4
9	Ç	0,0063	0	0,0110	0
	BÇ1	0,0049	22.2	0,0089	19.1
	BÇ2	0,0031	50.8	0,0059	46.4
12	Ç	0,0078	0	0,0124	0
	BÇ1	0,0057	26.9	0,0096	22.6
	BÇ2	0,0035	55.1	0,0066	46.8

- Z1 ve Z3 zemin sınıfında model düzlem çerçevelerde elde edilen taban kesme kuvveti ve taban kesme kuvvetinin çerçeve ağırlığına oranı Şekil 14'de verilmiştir. Ayrıca dolgu duvarlı modellerin taban kesme kuvvetinin dolgu duvarsız modellerin taban kesme kuvvetine oranı Tablo 6'da belirtilmiştir.



Şekil 14. Model Çerçevelerin Taban Kesme Kuvveti/Ağırlık Oranlarının Karşılaştırılması

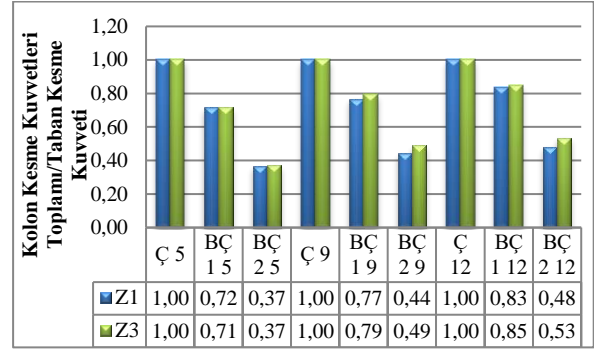
**Tablo 6.** Model Çerçevelerde Taban Kesme Kuvveti ve Dolgu Duvarsız modellere göre % Değişimleri

Modeller	Taban Kesme Kuvveti (kN)	Taban Kesme kuvveti/Ağırlık	Değişim (%)
Ç 5-Z1	267	0,075	
BÇ1 5-Z1	310	0,088	16,10
BÇ2 5-Z1	395	0,112	47,94
Ç 9-Z1	333	0,050	
BÇ1 9-Z1	381	0,057	14,41
BÇ2 9-Z1	474	0,070	42,34
Ç 12-Z1	354	0,040	
BÇ1 12-Z1	404	0,045	14,12
BÇ2 12-Z1	501	0,056	41,52
Ç 5-Z3	443	0,125	
BÇ1 5-Z3	443	0,125	0
BÇ2 5-Z3	443	0,125	0
Ç 9-Z3	580	0,086	
BÇ1 9-Z3	665	0,099	14,66
BÇ2 9-Z3	825	0,123	42,24
Ç 12-Z3	616	0,069	
BÇ1 12-Z3	705	0,079	14,45
BÇ2 12-Z3	872	0,097	41,56

Z1 ve Z3 zemin sınıflarında model çerçevelerde taban kesme kuvvetleri incelendiğinde dolgu duvarların sisteme dahil edilmesi durumunda taban kesme kuvvetinin arttığı, dolayısıyla model çerçevelerde elde edilen taban kesme kuvvetinin çerçevelerin ağırlığına oranlarının da arttığı görülmüştür. Fakat 5, 9 ve 12 katlı dolgu duvarlı model çerçevelerin taban kesme kuvvetinin dolgu duvarsız çerçevelerde elde edilen taban kesme kuvvetine oranlarının her iki zemin sınıfında da yaklaşık aynı olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca Z3 zemin sınıfında 5 katlı modellerde taban kesme kuvvetleri eşit çıkmıştır. Bunun nedeni bu model çerçevelerin birinci doğal titreşim periyot değerlerinin spektrum karakteristik periyotları arasında kalmasıdır.

- Model düzlem çerçevelerin kolonlarında oluşan kesme kuvvetleri toplamı taban kesme kuvvetine oranları her iki zemin sınıfında incelenmiştir ve Şekil 18’de gösterilmiştir.



**Şekil 18.** Kolon kesme kuvvetleri toplamının taban kesme kuvvetine oranı

Dolgu duvarların taşıyıcı sisteme dahil edilmediği model çerçevelerde bu oran 1 iken dolgu duvarların taşıyıcı sisteme dahil edilmesi ile oluşturulan modellerde ise bu oranın 1’den küçük olduğu görülmüştür. Bu da bize dolgu duvarların taşıyıcı sisteme dahil edilmesinin kolonlarda oluşan kesme kuvvetinin azaldığı göstermektedir. Çerçevenin kat sayısının artışı bu oranın biraz artmasına yani kolonlara etki eden kesme kuvvetinin artmasına neden olduğunu göstermiştir. Zemin sınıfının değişiminde bu oranlar incelendiğinde 5 katlı çerçevelerde değişiklik olmadığı 9 ve 12 katlı çerçevelerde ise bu oranın biraz daha büyük olduğu belirlenmiştir.

#### 4. Sonuçlar

Dolgu duvarların modellenmesinde farklı yaklaşımlar kullanılarak hazırlanan modellerin farklı zemin sınıflarına ait analiz sonuçlarından; birinci moda ait doğal titreşim periyotları, kat yatay yerdeğiştirmeleri, görel kat ötelemeleri, görel kat ötelenme oranları, taban ve kolon kesme kuvvetleri elde edilmiş ve karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- ✓ Model çerçevelerin her iki zemin sınıfında periyot değerlerinin kat sayısına bağlı olarak arttığı fakat kat sayısının, dolgu duvarsız modellere göre değişim yüzdesinde bir değişikliğe neden olmadığı belirlenmiştir.

- ✓ Tüm model çerçevelerde her iki zemin sınıfında elde edilen max. yerdeğiştirme ve görelî kat ötelenme değerlerinin dolgu duvarların taşıyıcı sisteme dahil edilmesi durumunda azaldığı, katsayısının artışında ise bu değerlerin arttığı belirlenmiştir. Dolgu duvarların taşıyıcı sisteme dahil edilmesi durumunda yapı daha rijit davrandığı için max. tepe yer değıştirme ve görelî kat ötelenme değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Fakat dolgu duvarlı çerçevelerin dolgu duvarsız çerçevelere göre değışim yüzdesinde ise fazla bir değışiklik belirlenmemiştir. Tüm model çerçevelerde DBYBHY [12]'de verilen taşıyıcı elemanlarda görelî kat ötelenme oran sınırı olarak verilen 0,02 değerinin aşılmadığı fakat literatürde [5] 0,005-0,007 olarak tuğla dolgu duvarlar için verilen hasar sınırı dolgu duvarların taşıyıcı sisteme dahil edilmediğı ve Z3 zemin sınıfındaki çoğıu modelle aşıldığı görülmüştür.
- ✓ Taban kesme kuvvetinin Z3 zemin sınıfında, Z1 zemin sınıfında elde edilen değerlerden daha büyük olduğı görülmüştür. 5, 9 ve 12 katlı dolgu duvarlı model çerçevelerin taban kesme kuvvetinin dolgu duvarsız model çerçevelerin taban kesme kuvvetine oranlarının yaklaşık aynı olduğı belirlenmiştir. Ayrıca Z3 zemin sınıfında 5 katlı dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız modellerde taban kesme kuvvetleri eşit çıkması bu model çerçevelerin birinci doğıal titreşim periyot değerlerinin spektrum karakteristik periyotları arasında kalmasıdır. Düzlem çerçevelerde dolgu duvarların sisteme dahil edilmesi durumunda taban kesme kuvveti arttığı için taban kesme kuvvetinin düzlem çerçevelerin ağırlığına oranları da artmıştır.
- ✓ Model düzlem çerçevelerde kolonlarda oluşan kesme kuvvetleri toplamının taban kesme kuvvetine oranının kat sayısının artışıyla biraz arttığı belirlenmiştir. Ayrıca 9 ve 12 katlı çerçevelerde oluşan kolon kesme

kuvvetleri toplamının Z3 zemin sınıfında, Z1 zemin sınıfına göre biraz daha büyük olduğı belirlenmiştir.

Özetle bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre inceleme konusu kolon-kiriş çerçeve tipi betonarme yapılarda dolgu duvarların analitik modelde dikkate alınması durumunda gerek binanın modal analiz sonuçlarında gerekse de taban ve kolon kesme kuvvet dağılımında ve kat yer değıştirmelerinde önemli farklılıklar oluşturduğı görülmüştür. Bu nedenle tasarımcılar dolgu duvarları sadece düşey yük olarak almışsa, dolgu duvar ile çerçeve arasında etkileşimin olmaması için gerekli tedbirleri almalıdır. Aksi halde düzlem çerçeveler ele alınarak yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında dolgu duvarların yapı parametrelerinde meydana getirdiğı değışiklikler dikkate alınmalıdır.

## 5. Kaynaklar

1. Tasligedik, A.S., Pampanin, S., and Palermo, A. (2011). Damage Mitigation Strategies of 'Non-Structural' Infill Walls: Concept and Numerical-Experimental Validation Program. Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Society, Aucland, New Zealand, pp.120-127.
2. Yakut, A., Binici, B., Demirel, İ.O., ve Özcebe, G., (2013). Dolgu Duvarların Deprem Davranışına Etkisi, 2. Türkiye Deprem Mühendisliğı ve Sismoloji Konferansı, Hatay,1-10s.
3. Calvi, G.M., Bolognini, D. and Penna, A. (2004). Seismic Performance of Masonry-Infilled RC Frames – Benefits of Slight Reinforcements. Proceedings of SISMICA 2004, 60 Congresso Nacional de Sismologiae Engenharia Sismica, Portugal.
4. Zarnic, R., and Tomazevic, M., (1984). The Behaviour of Masonry Infilled Reinforced Concrete Frames Subjected to Cyclic Lateral Loding, References for Data Base of Confined Masonry Walls Proceeding of 8th WCEE, California, pp. 863-870.
5. METU EERC, (2012). November 2011 Van Earthquake Report. METU, Ankara, Turkey, 50s.
6. El-Dakhkhni, W.W., Elgaaly, M., and Hamid A.A. (2003). Three-Strut Model for Concrete Masonry-Infilled Steel Frames, Journal Of Structural Engineering, **129**: 177-185.

7. Asteris, P.G., Antoniou, S.T., Sophianopoulos, D.S., and Chrysostomou, C.Z. (2011). Mathematical Macromodeling of Infilled Frames, State of the Art. Journal of Structural Engineering. 137: 1508-1517.
8. Hendry, A. (1981). Structural Brickwork, Macmillan, London. 209 p.
9. Tar, İ.Ö. (2010). Dolgu Duvarların Modellenmesinde Kullanılan Eşdeğer Basınç Çubuğu Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 85s.
10. Baran, M. (2012). Dolgu Duvarların Betonarme Çerçevesi Yapıların Davranışı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27: 275-284.
11. FEMA 306, (1998). Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
12. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) (2007). T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara-Türkiye.
13. Smith, B.S. (1966). Behaviour of Square Infilled Frames. J. Struct. Eng., ASCE, **92**: 381-403.
14. TS 500 (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Madde 11- Betonarme Döşeme Sistemleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
15. SAP 2000 V15 (2015), Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computer and Structures Inc. Berkeley, California.

## 60 GHz mm-Dalga Bandı için Üç Boyutlu Bina İçi Büyükölçek ÇGÇÇ Kanal Modelleme

Barış Yüksekaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06800 ANKARA

\*barisy@ee.hacettepe.edu.tr

(Geliş/Received: 02.03.2018; Kabul/Accepted: 19.05.2018)

### Özet

Bu makalede, beşinci nesil (5G) 60 GHz milimetre dalga (mm-dalga) çok girdili çok çıkıtlı iletişim sistemleri için bina içi üç boyutlu (3D) kanal modelleme işlemleri bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. 5G iletişim sistemlerinde kullanılacak en önemli aday teknolojilerden biri olan mm-dalga iletişimde kanal karakteristik özelliklerinin modellenmesi önem taşımaktadır. Ancak, mm-dalga iletişiminin bu önemine rağmen literatürdeki kanal modelleme çalışmaları yeterli değildir. Bu çalışmada literatürde katkıda bulunmak amacıyla bilgisayar ortamında kanal modelleme ve çoklu yol kanal katsayıları hesaplanması işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kanal modelleme işleminde iletişim ortamının, verici anten dizisinin ve alıcı anten dizilerinin geometrileri ortaya çıkartılmıştır ve ışın takip etme yöntemi ile tüm çoklu yol kanalları hesaplanmıştır. Modellemesi gerçekleştirilen mm-dalga kanallarının başarımlarının incelenmesi için çoklu yol gecikme yayılımı ve çoklu yol güç içeriği sonuçları incelenmiştir ve gelecekteki donanım uygulamalarını test etmek için kullanılacak yararlı bir simülasyon elde edilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda incelenilen mm-dalga kanallarının gecikme yayılımının uzunluğu nedeniyle frekans seçici kanallar olduğu ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:**Kablosuz İletişim, Beşinci Nesil İletişim Sistemleri, Büyükölçek ÇGÇÇ, Kanal Modelleme, Işın Takip Etme.

## Three Dimensional Indoor Massive MIMO Channel Modelling for 60 GHz mm-Wave Channel

### Abstract

In this paper, an indoor three dimensional (3D) channel modelling scheme is realized for fifth generation (5G) 60 GHz millimeter wave (mm-wave) multiple input multiple output communication systems using computer simulations. It is important to model channel characteristics of mm-wave communication which is one of the most important candidate technologies to be used in 5G communication systems. However, despite the importance of mm-wave communication, channel modeling studies in the literature are not sufficient. In this study, channel modeling and computation of multipath channel coefficients were performed in the computer environment for the purpose of contributing to the literature. In the channel modeling process, the geometry of the communication medium, the transmitting antenna array and the receiving antenna array are generated, and all multipath channels are calculated by ray tracing method. In order to investigate the performance of the modeled mm-wave channels, multi-path delay propagation and multi-path power content are examined and a useful simulation that will be used for testing future hardware applications is obtained. The performed simulations showed that the mm-wave channels studied are frequency-selective in nature due to the length of multi-path delay propagation.

**Keywords:** Wireless Communications, Fifth Generation Communication Systems, Massive MIMO, Channel Modelling, Ray Tracing.

### 1. Giriş

İletişim endüstrisinin en hızlı büyüyen parçası kablosuz iletişim teknolojileri olarak düşünülmektedir [1]. Yakın gelecekte, toplumun, endüstri ve hizmet sektörlerinin artan bir eğilimle yeni nesil haberleşme teknolojilerine daha

bağımlı hale gelecekleri açıktır [2]. Tüm dünyada kablosuz ağlara erişen kablosuz cihazların sayısı hızlı bir artış sergilemektedir. Cisco tarafından 2017 başında yapılan tahminlere göre [3], 2021 yılında mobil cihazlar ve bağlantılar 11.6 milyar sayısına ulaşacak ve dünyanın nüfusunu geçecektir. Ayrıca, dünya çapındaki aylık mobil

veri trafiğinin de 49 Exabit'i ( $49 \times 10^{18}$ ) geçeceği tahmin edilmektedir. Bu rakam 2013 yılında ölçülen değerlerin 30 katından daha fazladır. Bu gibi sebepler nedeniyle, servis kalitesi (Quality of Service, QoS) kısıtları altında yüksek veri hızları sağlamak adına yeni teknolojiler ve çözümler bulunması gerekmektedir. Bu bağlamda, özellikle bant genişliği kablosuz sistemler için önemli bir kaynaktır. Çünkü artan kablosuz cihazlar, kullanılan bant genişliğini arttırmakta ve spektrum kıtlığına sebep olmaktadır. Bu durum, 5G iletişim sistemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç doğurmuştur ve sektör 5G için aday teknolojiler arayışına girmiştir. mm-dalga iletişim sistemleri 5G iletişimde kullanılması öngörülen en önemli adaylardandır [4].

Şu anki kablosuz servislerin çoğu 10 GHz bandının altında kalan frekans aralığını kullanmaktadır ve bu durum da artan bir yoğunluğa sebep olmaktadır. Bu nedenle, gelecek nesil 5G haberleşme sistemlerinde taşıyıcı frekanslarının, spektrumda yukarılara taşınması beklenmektedir. Bu durumun açık bir göstergesi, 60 GHz'lik mm-dalga bandında büyük bant genişliklerinin lisanssız kullanıma açılması olarak gösterilebilmektedir. Tahsis edilen bu frekans spektrumundaki dünya çapında kurallar hakkında detaylı bilgi [5]'te bulunabilir. Çoklu ortam (Multimedia) içeriklerinin hızla artışı da daha yüksek veri hızları için sürekli artan toplum talebinin sebeplerinden biri olarak gösterilmektedir. Milimetre-dalga sistemlerdeki 60 GHz bandındaki 7 GHz'e kadar kullanılabilir spektrum aralığı 5G haberleşme sistemlerindeki veri hızı ihtiyacını karşılayabilecek en önemli adaylardandır.

Milimetre-dalga terimi 30-300 GHz aralığındaki geniş frekans bandını ve dalga boyunun 1-10 milimetre mertebesinde bulunduğu aralığı ifade etmektedir. Gelecek nesil kablosuz iletişim sistemlerindeki yüksek veri hızları ihtiyacı, araştırmacıların ve endüstrinin mm-dalga spektrumuna ilgisini gün geçtikçe arttırmaktadır [6-8]. Radar sistemlerinde ve iletişim sistemlerinde mm-dalga tekniklerinin kullanımının birçok fayda sağlaması beklenmektedir. mm-dalga frekans aralığının çekici olmasına gösterilebilecek birkaç sebep aşağıda sıralanmıştır:

- mm-dalga bandındaki kullanılabilir bant genişliği, düşük frekanslardakine göre çok

daha geniştir. Örneğin, 60 GHz etrafındaki %5'lik bir bant genişliği bile 3 GHz genişliğindedir ve kablosuz veri iletişimi için yeterli bir aralıktır.

- Ultra geniş bantların aksine yüksek güçte iletme izin verilmektedir ve daha fazla efektif yönelemlenmiş ışın gücü (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP) kullanılabilir [9, 10].
- Halihazırda bu frekans bandındaki uygulamaların az olması sebebiyle daha düşük girişim değerleri gözlenecektir.
- mm-dalga aralığında anten boyutları dalga boyuyla beraber küçülecektir. Böylece antenleri ve alıcı ön uç sistemlerini içeren bir radyo frekansı (RF) sistemi küçük boyutlu olacak ve çok küçük kapalı sistemler haline getirilebilecektir.
- Kısa dalga boyunda çalışabilmek küçük boyutta anten kullanımına olanak sağlayacaktır ve bu da küçük bir alan içerisinde çok sayıda anten sıkıştırılabilmesini sağlayacaktır. Böylece çok sayıda (büyük ölçek) anten kullanılarak dizi kazancı ve/veya anten çeşitleme kazancı artacaktır.

Birçok avantajı ve faydası olduğu belirtilen mm-dalga frekanslarının, bu avantajlarına rağmen, halihazırda uygulamalarda kullanılabilmesi için araştırılmaya ve geliştirilmeye ihtiyacı vardır. mm-dalga kablosuz kanallarındaki yayılım özellikleri düşük frekans bantlarına göre birçok farklılık göstermektedir. Örneğin, düşük frekanslara kıyasla mm-dalga frekansında boşluk-uzay yol kaybı (Free-Space Pathloss), taşıyıcı frekansının karesiyle ters orantılı olduğu için [11], daha fazladır. Girişim kaybı (Penetration Loss) ve gölgeleme etkisi (Shadowing) de yol kaybı gibi daha etkilidir [12]. Sonuç olarak, genellikle iletişim menzili kısadır. Bu sebeple, mm-dalga sistemlerinin geliştirilmesi için, bu kablosuz kanalların karakterize edilmesi, modellenmesi ve hesaplanması gerekmektedir. mm-dalga bandının önemine rağmen, kablosuz iletişim için genel 60 GHz kanal modellerinin eksikliği vardır. Örneğin, Almanya'da yapılan çalışmada [13], ışın takip etme yöntemi kullanılarak kanal modelleme gerçekleştirilmiş ancak iki boyutlu bir modelleme gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yatay ekseninde alıcıya gelen sinyallere ek olarak farklı yüksekliklerden gelebilecek sinyaller de göz



önüne alınarak üç boyutlu modelleme gerçekleştirilmiştir. Ayrıca literatürdeki benzer kanal modelleme çalışmalarının bir kısmında da [14, 15] alıcıda ve vericide tek anten kullanılarak kanal katsayıları hesaplanmıştır. Ancak mm-dalga sistemlerinin çok sayıda anten kullanımına izin verebilmesi sebebiyle anten sayısını tek antende tutmak pratiklikten uzak sonuçlar elde edilmesine sebep olmaktadır. Literatürdeki eksikliğin üstesinden gelebilmek için kapsamlı kanal modellemesi ve istatistiksel analiz gereklidir.

Bu çalışmanın temel amacı, 60 GHz mm-dalga bandı iletişim özelliklerini ortaya koyabilmek için üç boyutlu (3D) bina içi büyük ölçek çoklu giriş çoklu çıkış (ÇGÇÇ) kanal modelleme işlemlerini gerçekleştirmektir. Kanal modelleme işleminde ışın takip etme (Ray Tracing) [16] yöntemi kullanılacaktır. Işın takip etme yönteminde duvarlardan yansıyan ışınların geometrilerinin çıkartılabilmesi için de ayna yansıması (Mirror Image) tekniği kullanılmaktadır. Üç boyutlu modelleme işlemi için önce iki boyutlu modelleme gerçekleştirilecektir ve sonrasında taban ve tavan yansıma ışınları bulunarak üç boyuta geçilecektir. Modellemesi gerçekleştirilen kanalların iletişim özelliklerinin incelenmesi için çoklu-yol gecikme (Multipath Delay) ve çoklu-yol güç içeriği (Multipath Delay Content) gibi mm-dalga kanal özellikleri araştırılmıştır.

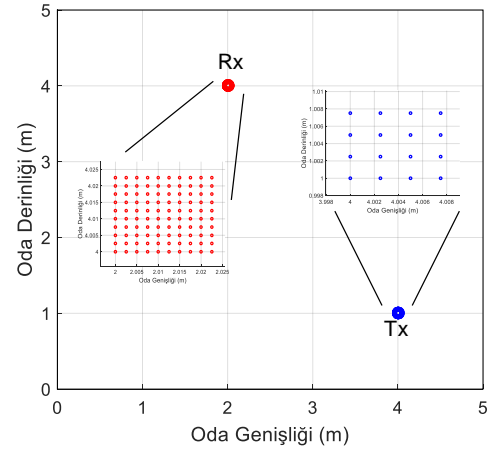
Bu makalenin en önemli katkısı, gerçekçi 60 GHz kablosuz kanal modellerinin eksikliğini gidermek olarak düşünülmektedir. Bu durumun üstesinden gelmek için kapsamlı kanal modellemesi ve istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir, iç mekan 60 GHz mm-dalga bandının özellikleri araştırılmıştır ve büyük ölçek ÇGÇÇ kanal modelleri elde edilmiştir. Ayrıca, elde edilen mm-dalga sistem modellemeleriyle, gelecekte yapılabilecek dizilim işleme teknikleri için bir genel çerçeve oluşturulmuştur.

## 2. Sistem Modeli

Kanal modellemesi için ilk olarak sistem modeli ve geometrisi oluşturulmalıdır. Verici ve alıcıdaki anten sayılarına karar verilmeli ve verici ve alıcının konumları bilinmelidir. Sonrasında verici anten(ler)den alıcı anten(ler)e yönlenecek olası ışınların geometrileri incelenmelidir.

Çalışmada kapalı ortam 5m×5m×3m'lik bir oda içerisinde bir verici ve bir alıcı olduğu varsayılmıştır. Üç boyutlu tasarıma geçilmeden önce iki boyutlu (taban ve tavan yansımaları göz ardı edilerek) modelleme gerçekleştirilecektir. Sonrasında ihmal edilen yansımalar da modele eklenerek üç boyutlu modelleme tamamlanacaktır.

Şekil 1'de çok antenli verici-alıcı çifti senaryosu (büyükölçek ÇGÇÇ senaryo incelemesi için vericide 16, alıcıda 100 adet anten) kuş bakışı olarak (iki boyutlu) gösterilmektedir. Tx verici anten dizisini, Rx'de alıcı anten dizisini ifade etmektedir.



Şekil 1. MIMO kanal senaryosu. Anten konumları büyütülmüş olarak da gösterilmektedir.

Kapalı odanın hem genişliği hem de derinliğinin 5m olduğu, yüksekliğinin de 3m olduğu varsayılmıştır. Hesaplama ve anlatım kolaylığı açısından verici ve alıcının aynı yükseklikte olduğu düşünülmüştür.

Çok antenli sistemlerde kanal modellemesi yapılırken, tüm antenlerden kaynaklanan çoklu yolların hesaplanmasının yaratacağı işlem fazlalığının azaltılması için, tek anten çiftinin referans olarak alınması ve bu referans kanal bilgisi kullanılarak çoklu anten kanal modellemesinin gerçekleştirilmesi literatürde sıklıkla kullanılmaktadır [17]. Referans anten kullanılarak elde edilen tek antenli kanal dürtü yanıtının verici ve alıcı dizi vektörleriyle çarpılması yoluyla da çok antenli senaryo kanal dürtü yanıtı hesaplanmaktadır. İlgili formülasyon aşağıda gösterilmektedir.

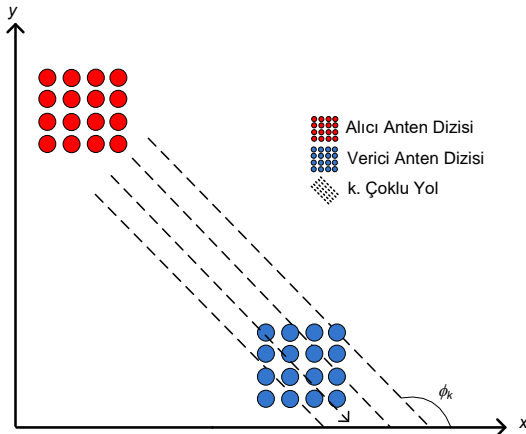
$$\tilde{\mathbf{H}}(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \mathbf{v}_{r,k} \mathbf{v}_{t,k}^T \alpha_k e^{j\phi_k} \delta(t - \tau_k), \quad (1)$$

Burada  $K$  vericiden alıcıya giden yol sayısını göstermektedir,  $\alpha_k$ ,  $\tau_k$  ve  $\phi_k$  sırasıyla  $k$ . yoldaki genliği, zamanda gecikmeyi ve fazı göstermektedir. Ayrıca,  $\mathbf{v}_{t,k}$  ve  $\mathbf{v}_{r,k}$  sırasıyla  $k$ . yoldaki verici ve alıcı dizi vektörlerini göstermektedir. Bu dizi vektörleri anten dizisi elemanlarının faz kaymalarını göstermekte ve

$$\mathbf{v}_{t,k} = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi f_c \frac{\mathbf{r}_1^T \mathbf{a}_k}{c}} \\ \vdots \\ e^{-j2\pi f_c \frac{\mathbf{r}_{N_{Tx}}^T \mathbf{a}_k}{c}} \end{bmatrix}, \mathbf{v}_{r,k} = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi f_c \frac{\mathbf{r}_1^T \mathbf{a}_k}{c}} \\ \vdots \\ e^{-j2\pi f_c \frac{\mathbf{r}_{N_{Rx}}^T \mathbf{a}_k}{c}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_n = \begin{bmatrix} r_{n_x} \\ r_{n_y} \\ r_{n_z} \end{bmatrix}, \mathbf{a}_k = \begin{bmatrix} -\sin \theta_k \cos \phi_k \\ -\sin \theta_k \sin \phi_k \\ -\cos \theta_k \end{bmatrix},$$

yapısında dırlar. Burada  $f_c$  taşıyıcı frekansını,  $c$  ışık hızını,  $\mathbf{r}_n$  vektörü  $n$ . antenin koordinatlarını,  $\mathbf{a}_k$  vektörü  $k$ . çoklu yolun geliş-gidiş açısıl pozisyon vektörünü,  $(\theta_k, \phi_k)$  çifti de eğim açısı ve azimut açısını göstermektedir. Antenlerin konumları ve eğim açısı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Anten koordinatları ve açısıl pozisyonun gösterildiği sistem geometrisi.

Bu durumda referans olarak seçilen anten çiftinin oluşturduğu çoklu yollar için genlik, zamanda gecikme ve faz hesaplandıktan sonra büyükölçek ÇGÇÇ kanal modellemesi tamamlanabilecektir. Öncelikle ayna yansımaları yöntemi ile duvarlardan yansıma sonucu oluşan çoklu yollar bulunacaktır.

Genlik katsayısı yol kaybı ( $PL_k$ ), oksijen emilimi kaynaklı kayıp ( $OL_k$ ) ve yansıma kaybı ( $RL_k$ ) terimlerine bağlı bir ifadedir. Yol kaybı frekansa ve uzaklığa bağlı bir ifadedir ve  $PL_k = \frac{4\pi d_k}{\lambda_c}$  şeklinde formülize edilmektedir.

Burada  $d_k$  terimi  $k$ . yolun katettiği mesafeyi,  $\lambda_c$  'de taşıyıcı dalga boyunu göstermektedir. Oksijen emilimi kaynaklı kayıp yaklaşık olarak kilometre başına 15dB olarak ölçülmektedir [9]. Matematiksel ifadesi de  $OL_k = 10^{d_k \cdot 1.5/1000}$  şeklindedir. Yansıma kaybı dalganın yansıdığı materyale ve geliş açısına bağlı olarak değişmektedir. Yansıma materyali dış mekanlarda granit ve iç mekanlarda alçı olarak kabul edilmektedir. Kayıplar geliş açısına bağlı bir tablodan seçilmektedir [4, 18]. Yol kaybı, oksijen emilimi kaynaklı kayıp ve yansıma kaybı terimleri hesaplandıktan sonra genlik kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\alpha_k = (PL_k \cdot OL_k \cdot RL_k)^{-1} \quad (3)$$

Sonrasında çoklu yollar büyükten küçüğe sıralanmakta ve en güçlü yol  $k=0$  indisini almaktadır. Eğer bir direkt görüş yolu (Line of Sight) varsa  $k=0$  indisini bu yol olarak seçilmektedir. Zamanda gecikme ve faz hesaplamalarında alıcının hem zaman hem de faz olarak en güçlü çoklu yol elemanı ile senkron olduğu varsayılmaktadır. Böylece, zamanda gecikme ve faz en güçlü yol'a göre ( $k=0$ ) hesaplanmaktadır.  $k$ . yolun zamanda gecikmesi, bu yolun katettiği mesafenin en güçlü yolun katettiği mesafeden farkının ışık hızına ( $c$ ) bölünmesi ile aşağıdaki şekilde

$$\tau_k = \frac{d_k - d_0}{c} \quad (4)$$

bulunmaktadır. Son olarak faz hesabında kullanılan matematiksel ifade ise

$$\psi_k = (\omega_c \tau_k + \pi N_{refl,k}) \bmod 2\pi \quad (5)$$

şeklindedir. Burada  $\omega_c$  radyan cinsinden taşıyıcı frekansını ve  $N_{refl,k}$  ise  $k$ . yolun toplam yansımaya sayısını göstermektedir. "mod" işlemi ölçeğe işlemidir. Yukarıda anlatıldığı gibi ışın takip etme yöntemi ile her çoklu yolun özellikleri hesaplandıktan sonra Eş.1 kullanılarak ÇGÇÇ kanal dürtü yanıtı matrisi elde edilecektir.

### 3. Işın Takip Etme Yöntemi ile Işın Geometrisi Oluşturulması

Daha önce bahsedildiği gibi ilk olarak iki boyutlu kanal modelleme işlemi gerçekleştirilecek, sonrasında taban ve tavan yansımaları modele eklenerek üç boyut modelleme elde edilecektir. Bu kısımda ilk olarak iki boyutlu ÇGÇÇ modelleme anlatılacaktır.

#### 3.1. İki boyutlu modelleme

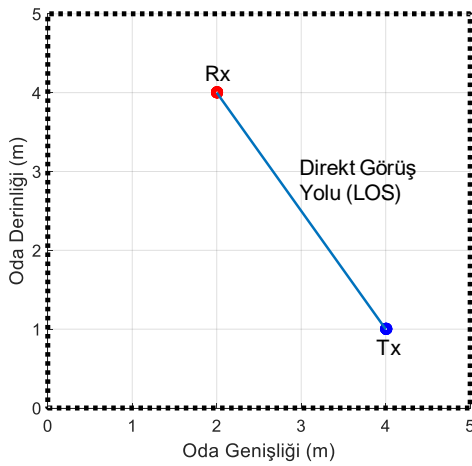
Şekil 1'de kuş bakışı gösterilen senaryoda alıcının koordinatları (2m,4m,1m) ve vericinin koordinatları da (4m,1m,1m) şeklindedir. İlk bulunacak yol direkt görüş yoludur (Line of Sight, LOS). Direkt görüş yolu vericiden alıcıya hiçbir

engelle karşılaşmadan çizilecek bir hattır ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

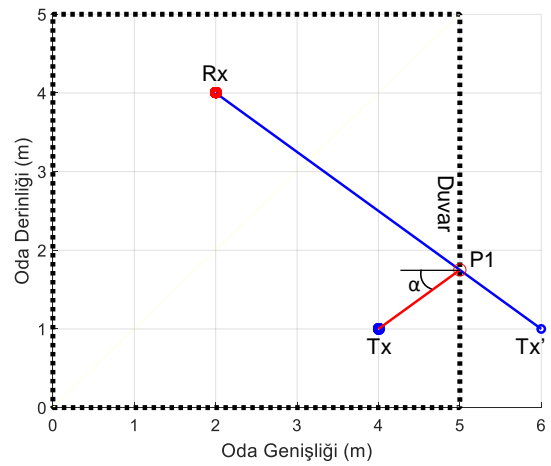
Duvarlardan yansıtılarak gelecek yolların bulunması ayna yansımaları yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Ancak sonsuz adet çoklu yolla karşılaşmaması için duvarlardan yansıtılarak oluşacak yollara bir sınır konulması gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda gösterildiği gibi [17, 19, 20], duvarlardan birden fazla yansımaya uğrayan sinyallerin güçleri çok fazla kayba uğramaktadır ve göz ardı edilebilir duruma gelmektedirler. Bu sebeple genellikle tek yansımaya uğrayan (Birinci Derece Yansımaya) sinyaller ışın takibinde kullanılmaktadır.

Birinci derece yansımaya yollarının bulunması için vericinin tüm engellere (duvarlara) göre ayna yansımaları alınmalıdır ve bu ayna yansımaları kaynakmış gibi düşünülerek yansımaya-alıcı arasındaki yol hesaplanmalıdır. Bu yolun mesafesi yansıyan yolun mesafesini verecektir. Şekil 4'te gösterildiği gibi Tx' noktası vericinin birinci duvara göre ayna yansımasıdır. Tx'-P1 ve Tx-P1 eşit mesafededir. Bu durumda ilgili birinci derece yansımaya yolunun mesafesi Tx'-Rx arasındaki mesafe ile bulunacaktır ve yansımaya açısı ( $\alpha$ ) da sistem geometrisi kullanılarak bulunabilecektir. Bu şekilde tüm duvarlar için birinci derece yansımaya yolları vericinin ayna yansımaları ile hesaplanabilmektedir. Yansımaya açıları ( $\alpha$ ) daha sonra yansımaya kaybı hesabında kullanılacaktır.

Yukarıda bahsedildiği gibi direkt görüş yolu ve birinci derece yansımaya hesaplandığında oluşacak çoklu yolların toplamı Şekil 4'te verilmektedir.



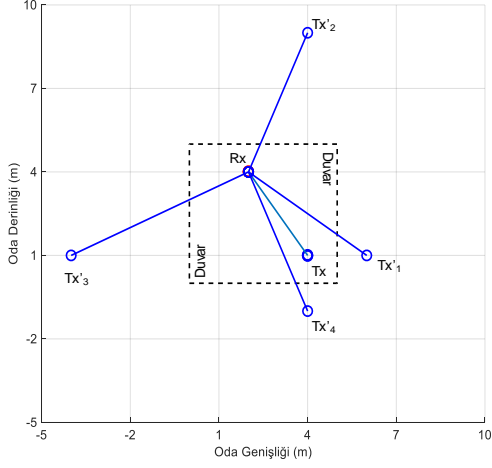
a)



b)

Şekil 3. a) Direkt görüş yolu. b) Birinci derece yansıma örneği.

## 3.2. Taban ve tavan yansımaları



Şekil 4. Anten koordinatları ve açısal pozisyonun gösterildiği iki boyutlu, kuş bakışı sistem geometrisi.

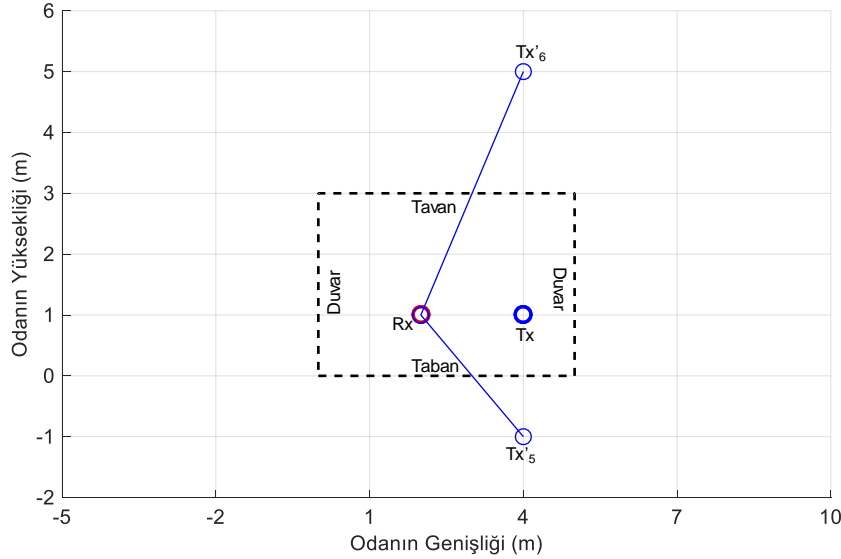
Bütün çoklu yol mesafeleri ve yansıma açıları bulunduğundan sonra iki boyutlu modelleme tamamlanacaktır ve üç boyutlu modellemeye geçilmesi için taban ve tavan yansımalarının geometrisinin bulunması gerekmektedir.

Taban ve tavadan yansyarak gelecek yolların geometrisi yine ayna yansıması yöntemiyle bulunacaktır. Ancak sonsuz adet çoklu yolla karşılaşılması için yine birden fazla yansıma uğrayan sinyaller göz ardı edilecektir ve birinci derece yansıma sinyaller kullanılacaktır.

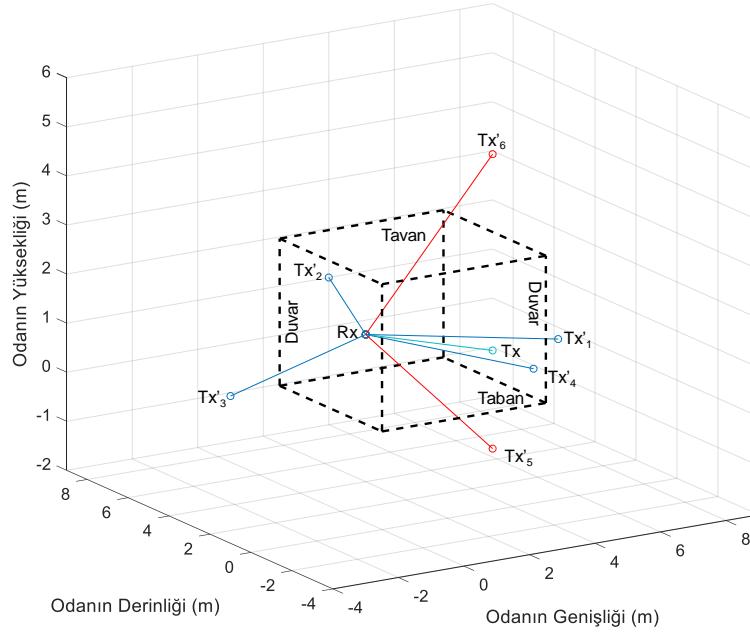
İki boyutlu kuş bakışı modelleme kısmında olduğu gibi birinci derece yansıma yollarının bulunması için vericinin taban ve tavana göre ayna yansıması alınmalıdır ve bu ayna yansıması kaynakmış gibi düşünülerek yansıma-alıcı arasındaki yol hesaplanmalıdır. Şekil 5'te taban ve tavan'dan yansıyan birinci derece yansıma yolları gösterilmiştir (sırasıyla Tx'5 ve Tx'6).

Taban ve tavan yansımaları da bulunduğundan sonra kanal geometrisi tamamlanacaktır. Direkt görüş yolu ve birinci derece yansıma yollarının oluşturduğu üç boyutlu kanal çoklu yolları geometrisi Şekil 6'da verilmektedir.

Bulunan taban ve tavan yansımaları kullanılarak kanal dürtü yanıtı 2. Bölümde anlatıldığı gibi Eş. (1) ile hesaplanacaktır.



Şekil 5. Anten koordinatları ve açısal pozisyonun gösterildiği iki boyutlu, profil sistem geometrisi.



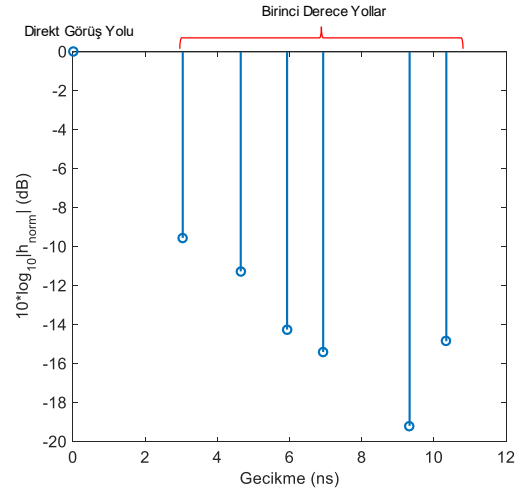
Şekil 6. Anten koordinatları ve açılal pozisyonun gösterildiği üç boyutlu sistem geometrisi.

#### 4. Simülasyonlar

Daha önceden bahsedildiği gibi mm-dalga bandı yüksek frekans bandı olduğu için yaşanacak kayıplar artacaktır, örneğin yol kaybı taşıyıcı frekansının karesi ile ters orantılıdır. Bununla beraber yüksek frekansta dalga boyu küçülecektir, dalga boyunun küçülmesi de daha küçük boyutlu antenlerin kullanılmasını ve antenler arasındaki mesafenin kısaltılmasını sağlamaktadır. Örneğin 60GHz bandında dalga boyu 5mm olacağı için antenler arasındaki mesafe 2.5mm olarak seçilebilmektedir. Bu da 10x10'luk bir anten dizisinin 2.5cm x 2.5cm'lik bir alanda toplanmasına olanak sağlayacaktır. Böylece 100 adet anten 6.25cm<sup>2</sup>'lik bir alana sıkıştırılacak ve anten çeşitliliği (antenna diversity) ile 100 antenin performansına etkisi incelenebilecektir. Çok sayıda anten kullanımını sistem performansının artmasını sağlayacaktır.

Şekil 1'de kuş bakışı ve Şekil 5'te profilden gösterilen ve modellemesi önceki bölümlerde anlatılan senaryoda verici anten matrisinin ilk elemanının koordinatları (4m,1m,1m)'dir ve alıcı anten matrisinin ilk elemanının koordinatları (2m,4m,1m) şeklindedir. Çok antenli alıcı senaryosunda vericide 16 ve alıcıda 100 adet anten olduğu varsayılmıştır. Senaryo geometrisi kullanılarak referans kanal dürtü yanıtı elde

edildikten sonra Eş.1 ile tüm antenler için toplam kanal dürtü yanıtı matrisi bulunacaktır. Şekil 7'de yukarıdaki örnek için referans anten çifti arasındaki simülasyonlar sonucu elde edilen normalize kanal dürtü yanıtı genliği verilmektedir.



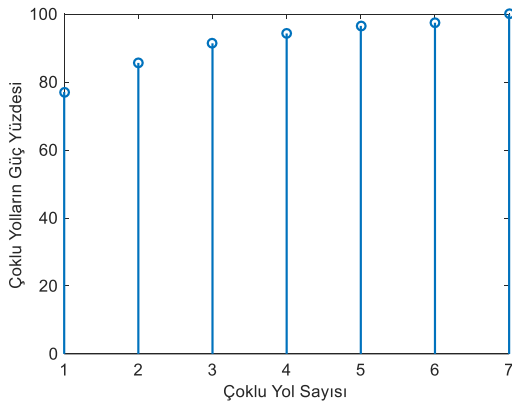
Şekil 7. ÇGÇÇ kanal senaryosunda modellenen referans anten çifti arasındaki kanal dürtü yanıtının normalize genlik-gecikme grafiği.

Şekil 7'de görüldüğü gibi direkt görüş yolu dürtüsü diğer çoklu yol dürtülerini domine etmektedir. Elde edilen kanal dürtü yanıtının

karakteristiklerinin incelenmesi için gecikme yayılması (Delay Spread) ve kanal dürtülerinin güçleri hesaplanmıştır.

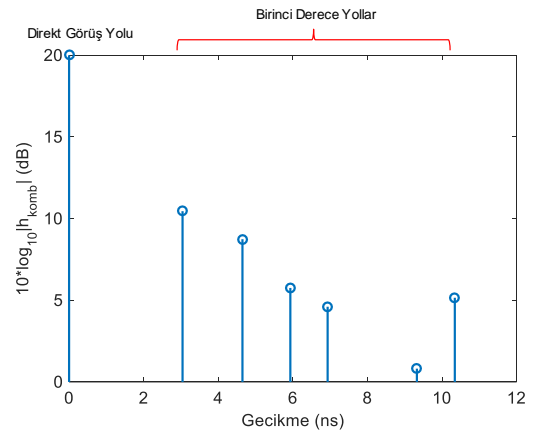
Kanal dürtü yanıtları detaylı incelendiğinde, son çoklu yolun gecikmesinin 10-12ns arasında olduğu görülmektedir. Bu değer gecikme yayılması olarak adlandırılır. Kapalı ortam odanın boyutları 5m×5m×3m olduğu için çoklu yol gecikmeleri diğer antenler için de 10-12ns bandının üzerine çıkmayacaktır ve yaklaşık olarak gecikme yayılması 12ns olarak hesaplanmıştır. Bu durumda evreyumlu bantgenişliği (Coherence Bandwidth) de yaklaşık olarak 83 MHz olarak hesaplanacaktır. 60GHz bandında mesaj sinyali bant genişliğinin 1-2 GHz aralığında olduğu bilinmektedir [18]. Bu durumda incelenen senaryo frekans seçici (Frequency Selective) bir kanal olacaktır [11]. Kanalın frekans seçici olmasından dolayı, negatif etkileri ortadan kaldırmak için, literatürde denkleştirme (Equalization) veya dikgen frekans bölüşümlü çoklama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) yöntemleri kullanılmaktadır [11, 21]. Önerilen mm-dalga senaryosunda da bu teknolojilerin kullanılması gerekmektedir.

Şekil 8'de farklı sayıda çoklu yolların güçlerinin toplam kanal gücüne göre yüzdesel oranları verilmektedir. Grafik incelendiğinde toplam gücün %80'e yakınının direkt görüş yolunda olduğu anlaşılmaktadır ve ilk 4 çoklu yolun toplam gücün %99'una sahip olduğu görülmektedir. Bu durumda kanalın modellenmesi işleminde en büyük önem direkt görüş yolunda ve ilk üç birinci derece yansıma çoklu yollarındadır.



Şekil 8. ÇKÇÇ kanal senaryosunda modellenen kanaldaki çoklu yolların güç yüzdesi.

Daha önce belirtildiği gibi, çok sayıda alıcı antenin kullanılmasının sonucu olarak iki tür performans artışı meydana gelebilir; bunlardan biri dizilim kazancı, diğeri ise alıcı anten çeşitliliğidir. Dizi kazancı, alınan sinyallerin uyumlu bir şekilde birleştirilmesiyle oluşmaktadır ve sönümlenme olmadığı durumlarda bile fayda sağlayabilmektedir. İkinci olarak anten çeşitliliğinin getireceği performans artışından bahsedilebilir. Bağımsız sönümleme çoklu yollarının uyumlu birleştirilmesiyle elde edilecek daha güçlü kanallar anten çeşitliliği kazancı olarak adlandırılır. Her iki yöntemde de sinyallerin uyumlu birleştirilmesi gereklidir ve seçici birleştirme (Selective Combining), eşik değeri birleştirme (Threshold Combining) ve azami oran birleştirme (Maximal Ratio Combining) gibi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir [11]. Örnek olarak incelenilen senaryoda 100 adet alıcı anten çıktılarının mükemmel birleştirilmesiyle elde edilen kanal dürtü yanıtı Şekil 9'da verilmektedir. Sonuçları gösterilen mükemmel kombinasyon gerçek zamanlı çalışmalarda gerçekleştirilemez, ancak, mm-dalga bandında dizi kazançları ve anten çeşitliliği kazançları üzerinde bir fikir verebileceği için incelenmesinde yarar vardır. Şekil 7 ve Şekil 9 karşılaştırıldığında görüleceği üzere, alıcıda 100 adet antenin mükemmel birleştirilmesi sayesinde tüm çoklu yollarda yaklaşık olarak 20dB kazanç elde edilmiştir.



Şekil 9. ÇKÇÇ kanal senaryosunda modellenen alıcı antenlerinin mükemmel birleştirilmesi sonucu oluşan kanal dürtü yanıtının genlik-gecikme grafiği.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, büyükölçek çoklu giriş çoklu çıkış (ÇGÇÇ) kanallar için bina içi 60 GHz mm-dalga bandının özelliklerinin anlaşılması için gerekli kanal modelleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca literatürdeki gerçekçi uygulamalar için kullanılabilir 60 GHz ÇGÇÇ kanal modellerinin eksikliği giderilmeye çalışılmıştır.

Elde edilen kanal modelleri ışın takip etme ve ayna yansıması yöntemleri kullanılarak oluşturulmuştur. Modellenen kanallar için kanal dürtü yanıtı oluşturulmuş ve güç içeriği ve çoklu yol gecikme yayılımı gibi özellikleri bakımından incelenmiştir. Gerçeklenen bilgisayar simülasyonlarında direkt görüş yolunun üstünlüğü gösterilmiştir.

Buna ilave olarak, gecikme yayılımının uzunluğu nedeniyle kapalı ortam kanalın frekans seçici olduğu gösterilmiştir. Kanalın frekans seçici olması ve mm-dalga kanallarda daha fazla etkili olan yol kaybı, girim kaybı ve gölgeleme etkisi gibi kanal koşulları ile mücadele etmek adına çeşitli teknikler geliştirilmesi gerekmektedir. Gelecek çalışmalarda dizilim işleme (Array Processing) teknikleri ve OFDM tabanlı mm-dalga alıcılar gibi frekans seçici kanallarla baş edebilecek yapıların kullanılması gerektiği ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada saçılma (Scattering) etkisi incelenmemiştir. Daha doğru kanal modelleri elde edebilmek adına gelecek çalışmalarda saçılma etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, bilgisayarla modelleme gerçekleştirildikten sonra kanal analizörler ve kanal alıcıları ile tasarlanan sistemlerin gerçek çıktıları simülasyon çıktıları ile karşılaştırılarak daha gerçekçi modeller geliştirilmesi gelecekteki çalışmalar için göz önünde bulundurulmalıdır.

Daha önce bahsedildiği gibi, gerçekleştirilen büyükölçek ÇGÇÇ senaryo alıcısında 100 adet anten kullanılmıştır. mm-dalga sistemlerin kısa dalga boyu sayesinde antenler arasındaki mesafe çok kısa tutulabilmektedir ve 100 adet anten yaklaşık olarak sadece 6.25 cm<sup>2</sup> alan kaplayacaktır. Böylece gerçek zamanlı sistemlerde çok sayıda anten çok küçük bir alana

sıkıştırılarak kullanılabilir ve dizi kazancı ve anten çeşitliliği kazancı elde edilebilecektir.

## 6. Teşekkür

Bu çalışma Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FBI-2016-9815 numaralı Uluslararası Bilimsel İşbirliği Geliştirme kapsamında desteklenmiştir.

## 7. Kaynaklar

1. Akın, M., Çakır, M., Yıldız, D., Özgen, H. ve Yarkan, S. (2015). A low-cost, real-time, and short-range software-defined digital wireless communications transceiver design and implementation at baseband. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **30(2)**: 217-224.
2. Yıldırım Okay, F. ve Özdemir, S. (2015). Improving coverage in wireless sensor networks using multi-objective evolutionary algorithms. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **30(2)**: 143-153.
3. Index, C.V.N. (2017). Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2016-2021.
4. Rappaport, T.S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G.N., Schulz, J.K., Samimi, M. ve Gutierrez, F. (2013). Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!. *IEEE Access*, **1**: 335-349.
5. Yong, S.K. ve Chong, C.-C. (2007). An overview of multigigabit wireless through millimeter wave technology: Potentials and technical challenges. *EURASIP J. Wireless Commun. and Networking*, **1**: 50-50.
6. Brady, J., Behdad, N. ve Sayeed, A.M. (2013). Beamspace MIMO for millimeter-wave communications: System architecture, modeling, analysis, and measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **61(7)**: 3814-3827.
7. Gupta, A. ve Jha, R.K. (2015). A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies. *IEEE Access*, **3**: 1206-1232.
8. Agiwal, M., Roy, A. ve Saxena, N. (2016). Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **18(3)**: 1617-1655.
9. F.C.C. (1997). Millimeter-wave propagation: Spectrum management implications. *Federal Communications Commission Document*.

10. Xiao, S., Zhou, M. ve Zhang, Y. (2008). Millimeter Wave Technology in Wireless PAN, LAN, and MAN. CRC Press.
11. Goldsmith, A. (2005). Wireless Communications. Cambridge University Press.
12. Smulders, P. (2002). Exploiting the 60 GHz band for local wireless multimedia access: prospects and future directions. *IEEE Communications Magazine*, **40(1)**: 140-147.
13. German, G., Spencer, Q., Swindlehurst, L. ve Valenzuela, R. (2001). Wireless indoor channel modeling: Statistical agreement of ray tracing simulations and channel sounding measurements. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'01)*, **4**: 2501-2504.
14. Gaddar, M., Talbi, L. ve Denidni, T.A. (2003). Millimeter wave propagation modelling for indoor high-speed PC systems, *International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 2003)*, **2**: 767-770.
15. Sasmal, S., Mishra, S., Behera, B.R. ve Bandopadhyaya, S. (2016). Ray tracing channel model for millimeter-(mm-) wave systems. *IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, 281-284.
16. Gustafson, C., Haneda, K., Wyne, S. ve Tufvesson, F. (2014). On mm-wave multipath clustering and channel modeling. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **62(3)**: 1445-1455.
17. Torkildson, E., Madhow, U. ve Rodwell, M. (2011). Indoor millimeter wave MIMO: Feasibility and performance. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **10(12)**: 4150-4160.
18. Samimi, M.K. ve Rappaport, T.S. (2014). Characterization of the 28 GHz millimeter-wave dense urban channel for future 5G mobile cellular. *Technical Report TR 2014-001*.
19. MacCartney, G.R., Zhang, J., Nie, S. ve Rappaport, T.S. (2013). Path loss models for 5G millimeter wave propagation channels in urban microcells. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 3948-3953.
20. Sulyman, A.I., Nassar, A.T., Samimi, M.K., MacCartney, G.R., Rappaport, T.S. ve Alsanie, A. (2014). Radio propagation path loss models for 5G cellular networks in the 28 GHz and 38 GHz millimeter-wave bands. *IEEE Communications Magazine*, **52(9)**: 78-86.
21. Nee, R.V. ve Prasad, R. (2000). OFDM for Wireless Multimedia Communications. Artech House, Inc.



## Atık Bor İçeren Asfalt Betonlarının Performanslarının Değerlendirilmesi

Mustafa KESKİN\*, Murat KARACASU

Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,  
İki Eylül Kampüsü, 26555, Tepebaşı/Eskişehir  
mustafakeski@anadolu.edu.tr

(Geliş/Received: 11.03.2018 ; Kabul/Accepted: 29.08.2018)

### Özet

Son yıllarda küresel ısınmanın da etkileriyle geri dönüşüm kavramı her alanda olduğu gibi inşaat mühendisliği alanında da çok önemli bir yer tutmaya başlamıştır. Yol mühendisleri geri dönüştürülebilir atık malzemeler ile asfalt betonu üretiminde bilimsel çalışmalar yapmakta ve çalışmalarını şantiye ortamında da uygulamaktadırlar. Bu çalışmanın amacı da çevre kirliliğine yol açan atık depolarının geri dönüştürülebilir bir halde asfalt betonu üretiminde kullanılmasının yollarını aramaktır. Dünya bor minerali rezervinin yaklaşık %70'lik bir dilimini bünyesinde barındıran Eskişehir ve çevre illerde oluşan atık borun yol inşaatı sektörünün hizmetine sokulması amaçlanmaktadır. Çalışmada 1.18mm'lik elek altında kalan ince ve filler malzemenin yerine, değişik oranlarda (%5, %10 ve %15) Ögütülmüş Atık Bor (ÖAB), Etibor-48 (Boraks Pentahidrat) (BP) ve Etibor-68 (Susuz Boraks) (SB) malzemeler kullanarak elde edilen asfalt beton numunelerinin performansları araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre; üç malzemenin de kullanımının gerekli şartnamelere uygun olduğu ispatlanmıştır. Bor atığı kullanımı ile çevresel kirlilik önenebilecek ve sürdürülebilir yaşam sağlanabilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Asfalt Betonu, Bor, Atık, Sürdürülebilir Yaşam

### Performance Evaluation Of Asphalt Concrete Containing Boron Wastes

#### Abstract

Nowadays, especially while the effects of global warming increase from day to day, the concept of waste recycling in the field of civil engineering, also in other areas, has become crucial. Transportation engineers carry out scientific studies in the production of asphalt concrete with recyclable waste materials and also apply their work in the construction site. The purpose of this paper is to find out possible recycling methods of the waste storage, which causes the environmental contamination and to determine the ways to reuse them in asphalt production. Eskişehir and nearby cities stands out with over 70% of the world's boron mineral reserves, that, rises the necessity to develop its active use in the road construction industry. In this study, the usability evaluation of asphalt specimens obtained in the result of adding, in the following percentages (5%,10% and 15%), of Crushed Waste Boron(ÖAB), Borax Pentahydrate(BP) and Borax Anhydrous(BA) used instead of passed-through the 1.18mm sieves fine aggregate and filler, was investigated. The results of the study has shown, that all three waste boron types, meet the required criteria. The reuse of boron waste will help to prevent contamination of the environment and to lead sustainable living.

**Keywords:** Asphalt concrete, boron, waste, sustainable living.

#### 1. Giriş

Geri dönüşüm, atık malzemelerin yeni ürünlerde kullanılabilir şekilde kurtarılması ve yeniden kullanılmasıdır[1]. Yol mühendisleri uzun yıllardır doğadaki atık malzemeleri geri dönüşüm vasıtasıyla sektöre kazandırmaya çalışmaktadırlar. Son yıllarda bor mineraline

sahip ülkelerde önemli derece bor atığı yığınları oluşmaktadır. Dünya bor rezervinin %72 si Türkiye'de bulunmaktadır[2]. Bu sebeple Türkiye'de dünyanın en büyük bor atıklarının oluşması kaçınılmaz olmuş ve oluşan atık depoları ülkede önemli yer işgal etmektedir. Sadece Eskişehir, Kırka'da yıllık 400.000 ton bor atığı oluşmaktadır[3]. Bu atıklar sektörde farklı

çalışmalar ile kullanılmaya başlanmıştır[4] (Şekil.1).



Şekil 1. Atık bor sahası

Atıkların asfalt betonunda kullanılmaya başlanması 2000li yılların başlarında olmuştur. Yapılan çalışmalarda boraks, sepiolit, zeolit, atık lületaşı ve sediman yakma taban külü(sediment incineration bottom ash=SIBA) kullanarak bu malzemelerin asfalt karışımlarda kullanılabilme olasılığı araştırılmıştır. Bu malzemelerin dolaylı çekme dayanımını ve birim ağırlık değerlerini azalttığı, akma değerlerini ise artırdığı tespit edilmiştir. Farklı atık oranlarında hazırlanan numunelerde Marshall Stabilité değerinin sepiolitte artış gösterdiği, boraks, zeolit, lületaşı ve SIBA ile hazırlanan numunelerde ise azaldığı belirtilmiştir[5]. 2013 yılında yapılan başka bir çalışmada ise asfalt betonu karışımlarda filler malzemesi olarak bor atıklarının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Atıkları değerlendirmek amacıyla yapılan bu çalışmada bor atıklarının asfalt kaplamalarda alternatif filler olarak kullanılabilceği belirtilmiştir[6]. 4 farklı bor minerali ile yapılan farklı bir çalışmada ise bor modifiyeli bitümlerin reolojik özellikleri incelenmiş, minerallerin bitüm ile elektrostatik kimyasal bağ oluşturduğu belirtilmiştir. Bor ile bitüm modifiyesi; penetrasyon değerlerini düşürmüş, yumuşama noktası ve parlama noktası değerlerini artırmıştır. Sonuçta rijitlik değerlerinde iyileşme gözlenmiştir. Dinamik kayma reometresi deney sonuçlarına göre ise kompleks modül ( $G^*$ ) değerleri artmış, faz açısı ( $\delta$ ) değerleri azalmış yani oluklanma

direnci artmıştır. Dönel vizkozimetre (RV) deney sonuçlarına göre ise bütün modifiye bitümlerin viskozite değerleri artmıştır[7]. Gürer ve Selma tarafından yapılan bir çalışmada belirli oranlarda filler malzeme ile yer değiştirilen bor atıklarının asfalt betonu karışımına etkileri incelenmiş, atıklar ile hazırlanan asfalt betonu karışımların yol üst yapısında şartnameler dahilinde kullanılabilceği gösterilmiştir[8]. Çin’de oluşan bor atıklarının değerlendirilmesi amaçlı yapılan çalışmada bor atıklarının yol altyapısında kullanılabilirliği araştırılmış ve bu atıkların alt yapıda direk olarak kullanılabilceği ispatlanmıştır[9].

Bu çalışmada 1.18mm’lik elek altında kalan ince ve filler malzemeler; öğütülmüş atık bor için %5, 10 ve 15 oranlarında, Boraks Pentahidrat ve Susuz Boraks için %5 ve % 10 oranlarında yer değiştirilerek karışımlar oluşturulmuştur. Dolayısıyla karışım modifiyesi söz konusudur. Numuneler Marshall tasarım yöntemi ile hazırlanmış ve değerlendirilmiştir. Değerlendirme esnasında Boraks Pentahidrat ve Susuz Boraks katkılı numuneler %10 katkı oranından sonra Öğütülmüş Atık Bor katkılı numuneler ise %15 katkı oranından sonra dayanımlarını kaybetmeye başladıkları için katkı oranları bu yüzdelerde kesilmiştir. Deney sonuçlardan elde edilen sonuçlar ışığında, bor atıklarının ince agregası ve filler olarak asfalt betonlarında kullanılabilceği ispatlanmıştır. Bu sayede bor maden yatakları ve fabrikalarının bulunduğu yerlerde oluşan görsel ve çevresel kirlilik önenebilecektir. Atık bor kullanımı ile tüm dünya ülkelerince önümüzdeki yıllar için prensip haline gelen sürdürülebilir yaşam konusunda büyük faydalar sağlanabilecektir. Çalışmanın sonraki aşamalarında atık bor katkılı bitüm ve karışım numunelerinin dinamik ve statik sünme performans sonuçları değerlendirilecektir.

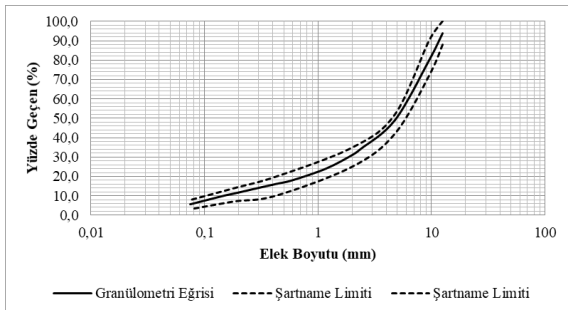
## 2. Malzeme

Bu çalışmada agregası olarak kireçtaşı kullanılmış, bitüm olarak ise İzmit Tüpraş rafinerisinden temin edilen 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Agregası gradasyonu seçilirken Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen aşınma tabakaları için TİP-1 gradasyon limitleri aralığında kalınmıştır.

Agregası deney sonuçları Tablo.1 ile agreganın dane dağılımı eğrisi ise Şekil.2 ile verilmiştir. Tablo.2 ve Tablo.3’ de ise sırasıyla bitümlerin reolojik özellikleri ve atık borun fiziksel özellikleri verilmiştir.

**Tablo 1.** Agreganın fiziksel özellikleri

Özellik	Değerler	Şartname Limiti	Standart
Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )			
Kaba Agregata	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2,688	TİP-1
	Zahiri Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2,745	TİP-1
	Yaş Hacim Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2,709	TİP-1
İnce Agregata	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2,618	TİP-1
	Zahiri Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2,729	TİP-1
	Yaş Hacim Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2,659	TİP-1
Filler	Zahiri Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2,688	TİP-1
Sıkışık Birim Hacim Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	1,469	-	ASTM C 29
Gevşek Birim Hacim Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	1,227	-	ASTM C 29
Los Angeles aşınma (%)	12,8	≤27	ASTM C 131
Yassılık indeksi (%)	16	≤20	ASTM D 4791
Donma-Çözünme direnci (%)	4	-	ASTM C 88

**Şekil 2.** Dane dağılımı eğrisi**Tablo 2.** Bitümün Reolojik Özellikleri

Deney	Değer	Şartname Limiti	Standart
Bitüm Kaynağı	Tüpraş, İzmit, Türkiye	-	
Penetrasyon (25°C, 100 gr)	64(50/70)	50-70	ASTM D5
Yumuşama Noktası (°C)	48	46-54	ASTM D36/D36M-09
Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1,028	-	ASTM D70-09e1
Düktilite (25°C, 5 cm/min)	>100 cm	≥100	ASTM D113-07
Isınma Kaybı (%)	0,43	≤0,5	ASTM D6-95
Parlama Noktası (°C)	314	≥230	ASTM D92-05a
Viskozite (135°C' de, cP)	437,5	-	ASTM D4402-06
Viskozite (165°C' de, cP)	137,5	-	ASTM D4402-06

**Tablo 3.** Atık Bor özellikleri

	ÖAB	BP	SB
Gevsek BHA, gr/cm <sup>3</sup>	1,086	0,982	1,099
Sıkı BHA, gr/cm <sup>3</sup>	1,263	1,088	1,268
Renk	Krem	Beyaz	Beyaz
Özgül ağırlık, gr/cm <sup>3</sup>	1,161	1,150	1,123

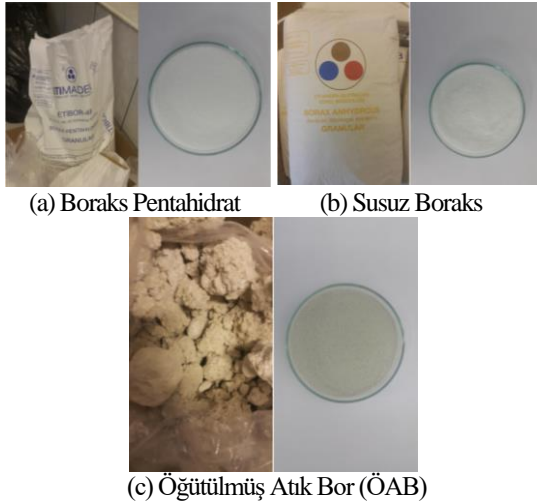
### 3. Marshall Tasarım Metodu

Bu çalışmada öncelikli olarak malzemelerin fiziksel ve mekanik davranışlarını anlamak ve optimum bitüm oranını (OBO) bulabilmek için Marshall tasarım metodu kullanılmıştır. Marshall tasarımı 1940lı yıllardan beri kullanılmakta olan bitümlü sıcak karışım tasarım metodudur. Asfalt betonu içinde kullanılacak optimum bitüm miktarını tayin etmek üzere yapılan bir deneydir. Bu deney; dane boyutu filler (0.075mm) ve 25 mm arasında değişen, belli bir granülometriye sahip agregalardan oluşan bitümlü karışımların dayanım, akma ve numune özellikleri hakkında sonuçlarının elde edilmesini sağlar [10,11].

Karışımlar 160°C'lik etüvlerde bekletilen malzemeler ile hazırlanmış, karışım sıcaklığı olarak

ise 135°C seçilmiştir. 1150gr agrega ile %3.5 ile %6.5 arası %0.5'lik artış ile kullanılan bitüm oranı ile hazırlanan karışımlar ağır trafik hacimli yollar için 75 vuruş değeri seçilerek oluşturulmuştur.

Marshall tasarımına göre 42 adet kontrol numunesi ve değişik tür ve oranlarda 147 atık bor katkılı modifiye numune hazırlanmıştır. 1.18mm'lik elek altında kalan ince agrega ve filler malzemenin bor atıkları ile değiştirilmesi neticesinde oluşturulan numuneler birbiri ile kıyaslanmıştır. Eti Kırka madenlerinden getirilen Boraks Pentahidrat (Şekil.3a) ve Susuz Boraks (Şekil.3b) malzemelerinin dane dağılımlarına incelendiğinde 1.18mm'lik elekten tamamının geçtiği görülmüştür. Dolayısıyla bu elek altında kalan tüm malzemenin karışıma katılması uygun görülmüştür. ÖAB malzemesi ise doğada toprak halde bulunmaktadır. Bu atıklar Los Angeles deney aleti ile yaklaşık 45 dakikalık bir öğütülme işlemi sonrası Şekil.3c' de görüldüğü haline getirilmiş ve yine 1.18mm'lik elek altında kalan kısımlar deneylerde kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan malzemelerin özgül ağırlık tayini yapılmış, bulunan değerler hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 3. Deneylerde kullanılan bor türleri

Farklı oranlardaki ÖAB ile modifiye edilmiş asfalt beton numunelere ait Marshall tasarım deney sonuçları Şekil.4' te verilmiştir. Bütün numunelerde Marshall dayanımı 900 kg dan yüksek çıkmıştır. Dayanım açısından şartname değerleri sağlanmaktadır. ÖAB atık oranı arttıkça karışımların özgül ağırlıkları azalmakta, boşluk oranları artmaktadır. Akma değerleri şartname sınırları (2-4mm) içerisindeydir. Ancak atık bor ilavesi ile numunelerin akma değerleri artmakta, dayanımlar azalmaktadır. Bu sonuçlar bize ÖAB içeren

numunelerin rijitliğinin daha az olduğunu göstermektedir.

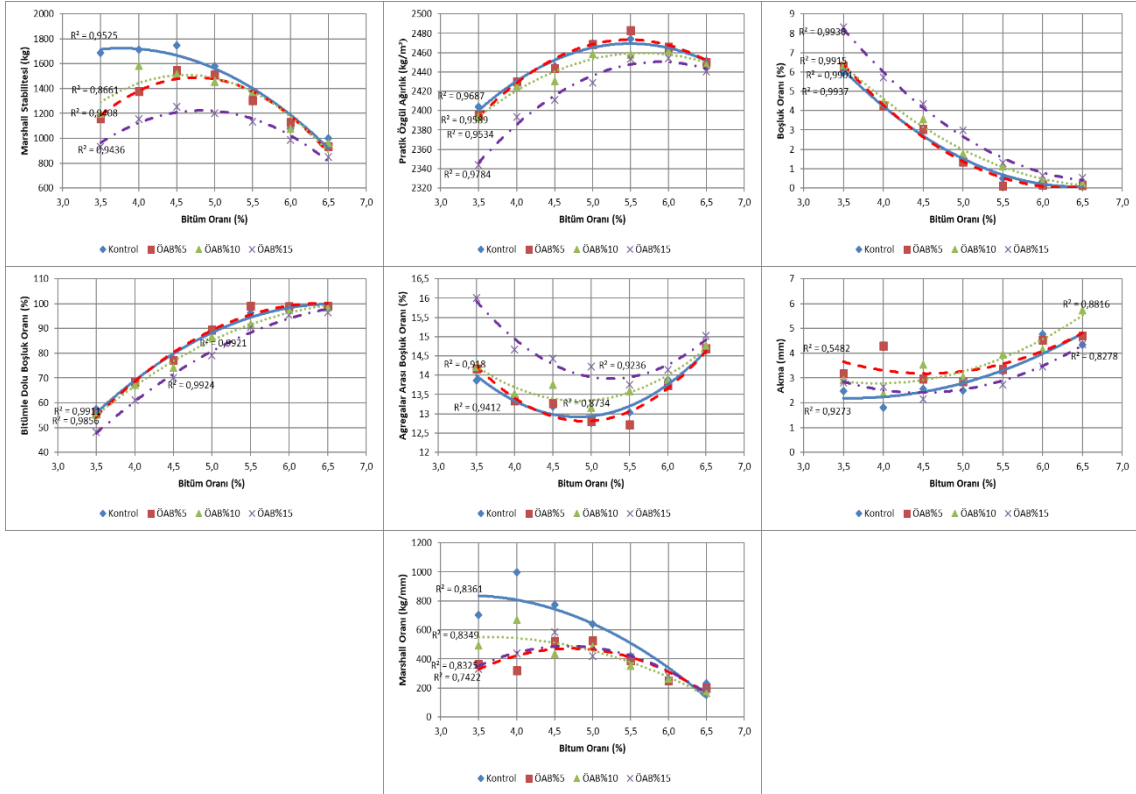
SB katkısı ile modifiye edilmiş asfalt beton numunelere ait Marshall tasarım deney sonuçları Şekil.5' te verilmiştir. Numuneler 900 kg lık Marshall dayanımı şartını sağlamaktadır. Karışımdaki SB oranı arttıkça karışımların özgül ağırlıkları azalmakta, boşluk oranları artmaktadır. Akma değerleri şartname sınırları (2-4mm) içerisinde ve kontrol numunelerine yakın değerlerdir. Düşük bitüm oranlarında SB ilavesi ile dayanımlar azalmakta, yüksek bitüm oranlarında dayanımlar tüm numunelerde birbirine yakın değerlere sahip olmaktadır. Numunelerin rijitliği içinde aynı gözlem sonuçları elde edilmiştir.

BP katkısı ile modifiye edilmiş asfalt beton numunelere ait Marshall tasarım deney sonuçları Şekil.6' da verilmiştir. BP katkılı numuneler; genel olarak SB içeren numuneler ile aynı benzer özellikleri göstermektedir.

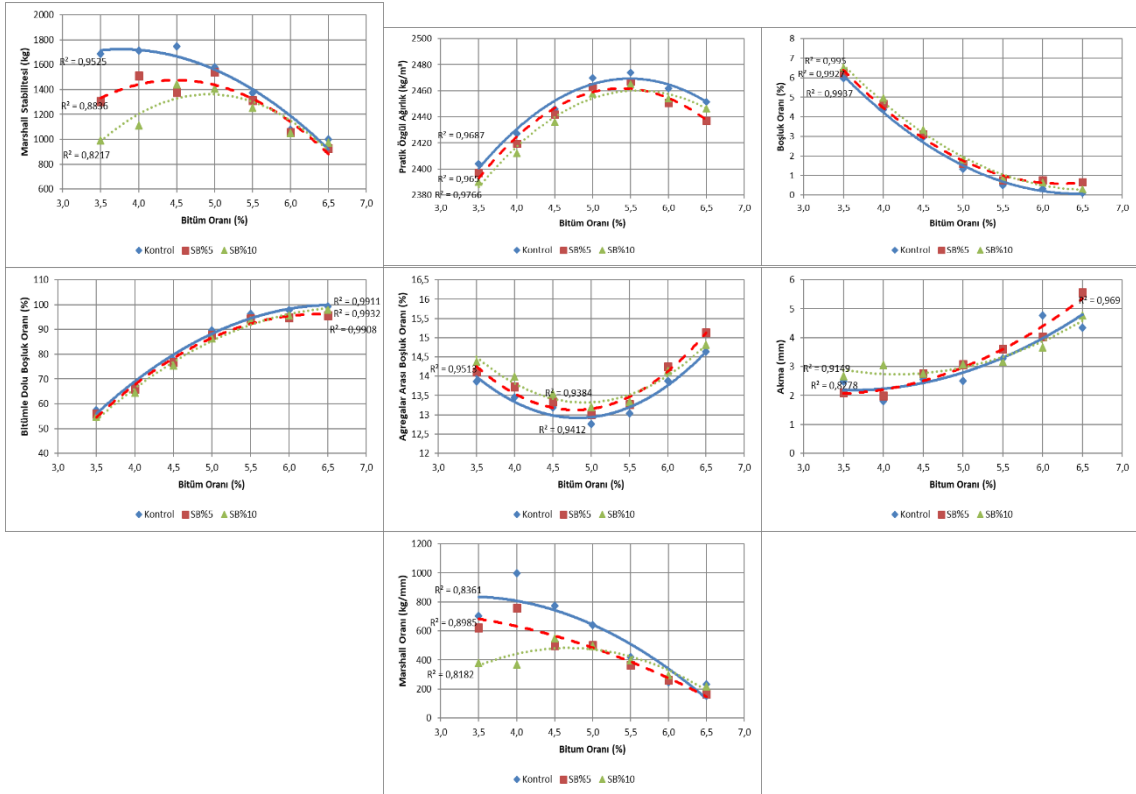
ÖAB katkılı numunelerde %15, SB ve BP katkılı numunelerde %10 oranında katkı ilavesinden sonra dayanım değerleri düştüğü için katkı artırımına gidilmemiştir. Bor atıklarının kullanıldığı katkı içeren ve normal katkı içermeyen numunelerin karşılaştırılmalarına ait sonuçlar Şekil.7'de verilmiştir.

Karşılaştırmalı değerlendirmeler için %10 katkı oranları kullanılmıştır. Bunun sebebi kullanılan katkıların elde edilme maliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Grafiklerden görüleceği üzere; ÖAB numuneleri dayanım yönünden kontrol numunelerine en yakın sonuçlara sahiptir. SB ve BP içeren numunelerde, katkı oranı arttıkça dayanım düşmektedir. Özgül ağırlık azalmakta ve boşluk oranları artmaktadır. Ayrıca SB ve BP içeren numunelerin rijitlik değerleri de düşüktür. SB ve BP katkısı içeren numunelere göre ÖAB numuneleri ekonomiklik ve çevreyi en az kirletme bağlamında daha fazla fayda sağlayacaktır. ÖAB içeren numuneler aşınma ve binder tabakaları için gerekli olan şartname değerlerini sağladıkları için, asfalt beton uygulamalarında kullanılabilir niteliğe sahiptirler.

Kontrol ve atık bor içeren numuneler için her bir serinin optimum bitüm oranı (OBO) değeri hesaplanmıştır. OBO değerleri hesaplanırken Stabilité ve Birim Ağırlık değerlerinin maksimum değerleri, hava boşluğu için %4 ve asfaltla dolu boşluk oranı için %70 değerlerine karşılık gelen bitüm yüzdesi değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Numunelerin OBO değerleri Tablo.4'de verilmiştir. OBO değeri bor katkı oranı arttıkça yükselmektedir.

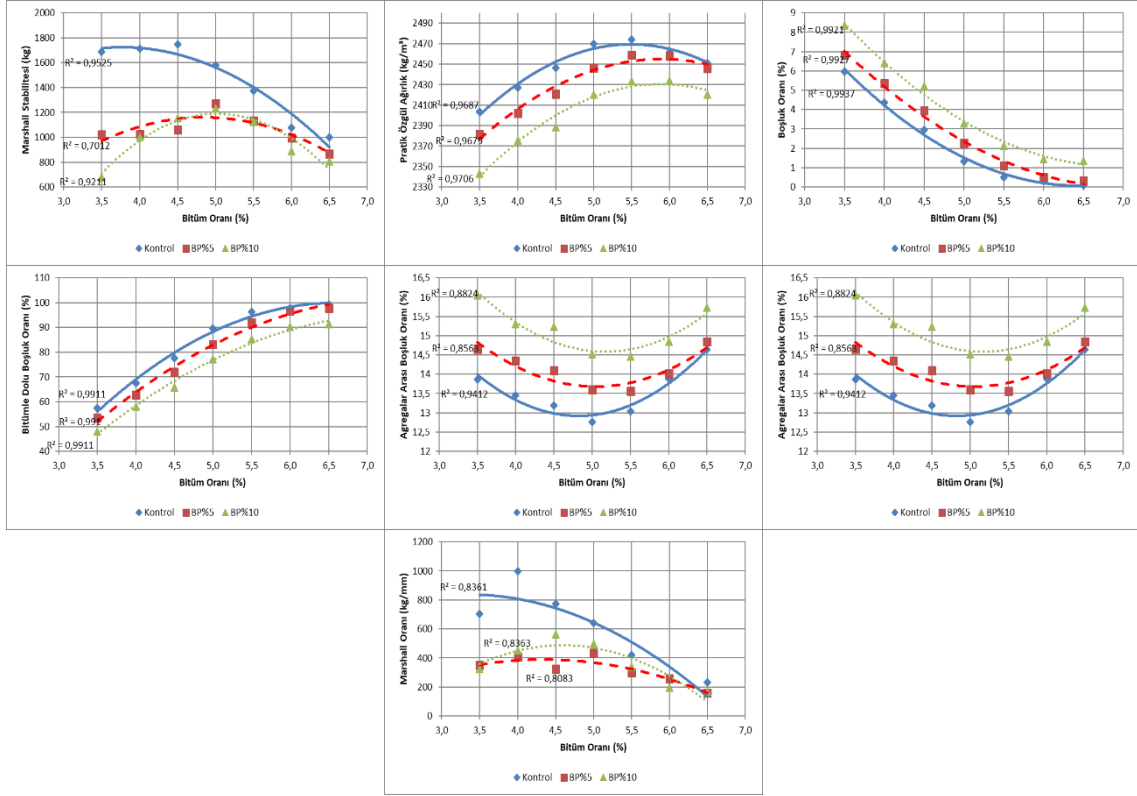


Şekil 4. Farklı oranlardaki ÖAB katkıli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

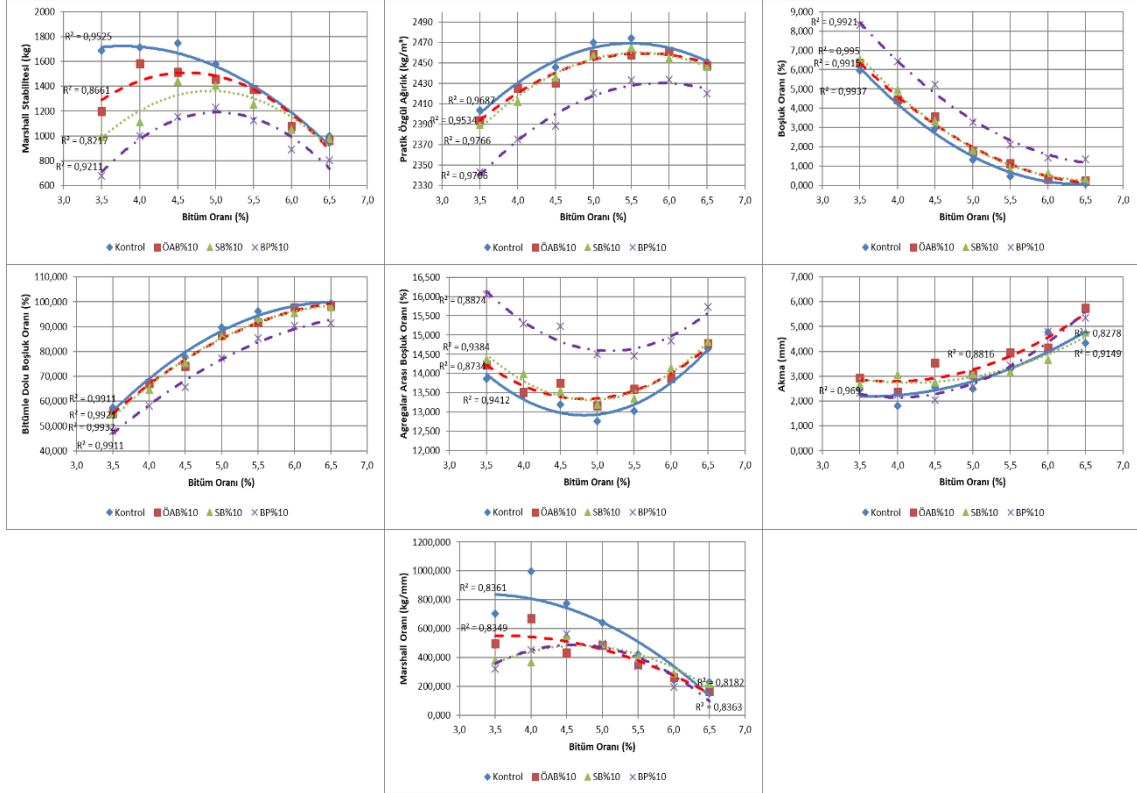


Şekil 5. Farklı oranlardaki Susuz Boraks katkıli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

Atık Bor İçeren Asfalt Betonlarının Performanslarının Değerlendirilmesi



Şekil 6. Farklı oranlardaki Boraks Pentahidrat katkıli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması



Şekil 7. %10 oranında bor atıkları kullanılarak hazırlanmış katkıli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

**Tablo 4.** Optimum bitüm oranı değerleri

Malzeme	Katkı oranı (%)	Optimum Bitüm Oranı (OBO) (%)
Kontrol	0	4.34
ÖAB	5	4.59
ÖAB	10	4.66
ÖAB	15	4.92
SB	5	4.53
SB	10	4.73
BP	5	4.85
BP	10	5.07

#### 4. Ekonomik Değerlendirme

Çalışmada ekonomik değerlendirme için 1km uzunluğunda yol(10m genişliğinde 15cm kalınlığında) için maliyet analizleri yapılmıştır. Sonuçlar katkısız ve % katkı oranlarında ÖAB, SB ve BP için ayrı ayrı hesaplanarak Tablo 5' te verilmiştir.

1 km yol için;

$$\text{Hacim}(V)=1000\text{m}\times 10\text{m}\times 0.15\text{m}=1500\text{m}^3$$

Asfaltın özgül ağırlığı  $\gamma=2,5 \text{ t/m}^3$  kabul edilerek

$$\text{Toplam ağırlık} = 1500 * 2,5 = 3750\text{t olur.}$$

Katkısız asfalt için;

Numune;

Agrega; 1150 gr

Bitüm; %4,34 (49,91 gr)

Toplam asfalt betonu numunesi; 1199,91 gr olur.

3750t katkısız asfalt betonu için;

$$\text{Agrega; } 1150 * (3750 / 1199,91) = 3594 \text{ ton}$$

$$\text{Bitüm; } 49,91 * (3750 / 1199,91) = 156 \text{ ton}$$

%10 ÖAB katkılı asfalt betonu için;

Numune;

Agrega; 1122,4 gr

ÖAB; 27,6 gr

Bitüm; %4,66 (53,59 gr)

Toplam asfalt betonu numunesi; 1203,59 gr olur.

3750t %10ÖAB katkılı asfalt betonu için;

$$\text{Agrega; } 1122,4 * (3750 / 1203,59) = 3497 \text{ ton}$$

$$\text{ÖAB; } 27,6 * (3750 / 1203,59) = 86 \text{ ton}$$

$$\text{Bitüm; } 53,59 * (3750 / 1203,59) = 167 \text{ ton}$$

**Tablo 5.** Maliyet hesapları

EKONOMİK ANALİZ		Agr. (t)	Bitüm (t)	Katkı (t)	TOPLAM (t)	Maliyet Artışı (%)
KATKISIZ (OBO:%4,34)	Miktar	3594	156	0	3750	0
	Birim Fiyat (ton/TL)	16	1503	0	1519	
	Maliyet (TL)	57.504	234.468	0	<b>291.972</b>	
%10ÖAB KATKILI (OBO:%4,66)	% 10 ÖAB	3497	167	86	3750	5
	Birim Fiyat (ton/TL)	16	1503	10	1524	
	Maliyet (TL)	55.952	251.001	860	<b>307.813</b>	
%10SB KATKILI (OBO:%4,73)	% 10 SB	3495	169	86	3750	7
	Birim Fiyat (ton/TL)	16	1503	15	1534	
	Maliyet	55.920	254.007	1.290	<b>311.217</b>	
%10BP KATKILI (OBO:%5,07)	% 10 BP	3483	181	86	3750	13
	Birim Fiyat (ton/TL)	16	1503	15	1534	
	Maliyet (TL)	55.728	272.043	1.290	<b>329.061</b>	

Agrega fiyatı =12 TL/ton

Agrega nakliye ücreti = 4TL/ton (Eskişehir Merkez için)

İzmit rafineri bitüm fiyatı = 1470TL/ton

Bitüm nakliye ücreti = 0,15TL/ton/km

Bitümün nakliye ücreti (İzmit-Eskişehir merkez, 217 km) = 217\*0,15=32.55 TL/ton

Öğütülmüş Atık Bor fiyatı (öğütme) = 5 TL/ton

SB ve BP atık bor fiyatı (paketleme) = 10 TL/ton

Atık bor nakliye ücreti= 5 TL/ton (Eskişehir Merkez için)

Katkısız asfalt betonu için maliyet:

$$[3594 * (12+4)]+[156 * (1470+32.5)] = 291.972 \text{ TL}$$

olarak bulunur.

%10 ÖAB katkılı asfalt betonu için maliyet:

$$[3497 * (12+4)]+[167 * (1470+32.5)]+[86 * (5+5)] = 307.813 \text{ TL olarak bulunur.}$$

1 km' lik yol için uygulanan hesaplar sonucunda, katkısız asfalt betonuna göre, ÖAB, SB ve BP atık içeren karışımlar için sırasıyla %5, 7 ve 13 oranlarında maliyet artışı gerçekleşmiştir. Bu durumda ÖAB atıklarının asfalt betonunda kullanımı daha ekonomik olacaktır. Çevresel etki ve sürdürülebilirlik bağlamında 86 ton atık borun geri dönüşümü sağlanabilecektir.

## 5. Sonuçlar ve Öneriler

Çalışmada yaklaşık 170 adet asfalt betonu numunesi hazırlanmış, bor katkısı ile hem asfalt betonunun performansını arttırmak hem de ekonomik ve çevresel kazanımlar hedeflenmiştir. Bu katkı ile geri dönüştürülebilir malzemeler sektörünün kullanımına sunulmaya açılmaya çalışılmış ve aşağıda sıralanan sonuçlar elde edilmiştir.

\* Optimum bitüm oranları bor katkı oranı arttıkça, yükselmektedir.

\* SB ve BP katkı ilavesi asfalt beton numunelerin özgül ağırlık ve boşluk oranlarını azaltmakta, dayanımı ve rijitliği düşürmektedir. Bu yüzden asfalt betonunda kullanımları uygun değildir.

\* SB ve BP katkı maddeleri işlenmiş malzemelerdir. Bu malzemelerin asfalt betonu yerine farklı alanlarda kullanımı daha faydalı olacaktır.

\* ÖAB içeren numuneler ile kontrol numunelerin deney sonuçları birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır.

\* ÖAB katkısını ilavesi ile optimum bitüm oranındaki artış oldukça düşüktür. ÖAB atığının asfalt betonunda kullanımı ile her 1 km yol için 86 ton atık değerlendirilmiş olacaktır. Elde edilen bu yakın sonuçlar ekonomiklik ve çevre kirliliğinin önlenmesi açısından oldukça değerlidir. Bu sonuçlar ÖAB un asfalt betonunda kullanılabileceğinin bir göstergesidir.

## 6. Kaynakça

1. Recycling. Encyclopædia Britannica (2018).
2. Banar, M., Güney, Y., Özkan, A., Günkaya, Z., Bayrakçı, E. and Ulutaş, D. (2016). Utilisation of waste clay from boron production as a landfill liner material. *Int. J. Mining, Reclam. Environ.* **200**: 1–17.
3. Karasu, B., Kaya, G., Yurdakul, H. (2002). Etibor Kırka Boraks İşletmesi konsantre ve türev atıklarının duvar karosu bünye özelliklerine etkisi. *1.Uluslararası Bor Sempozyumu, (3-4 Ekim 2002) Bildirileri*, Kütahya, 224-228.
4. Oruç, F., Sabah, E., Erkan E. (2004). Türkiye'de Bor Atıklarının Sektörel Bazda Değerlendirme Stratejileri. *2.Uluslararası Bor Sempozyumu, (23-25 Eylül 2004) Bildirileri*, Eskişehir, 385-393.
5. Karacasu, M., Koyuncu, H., Bakış, R., Taşpolat, L.T., Yılmaz, G. (2004). The use of Borax, Sepiolite, Zeolite, Waste Meerschaum and Contaminated River Sediment in Asphalt Concrete Mixtures. *2.Uluslararası Bor Sempozyumu, (23-25 Eylül 2004) Bildirileri*, Eskişehir, 441-447.
6. Kütük-Sert, T. & Kütük, S. (2013). Physical and Marshall Properties of Borogypsum Used as Filler Aggregate in Asphalt Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* **25(2)**:266–273.
7. Oruç, Ş., Yılmaz, B. & Sancak, K. (2016). Effect of boron-containing additives on rheological properties of asphalt binder. *Road Mater. Pavement Des.* **17(4)**:810–824.
8. Gürer, C. & Selman, G. Ş. (2016). Investigation of properties of asphalt concrete containing boron waste as mineral filler. *Medziagotyra* **22(1)**:118–125.
9. Zhang, Y. et al. (2016). Reuse of boron waste as an additive in road base material. *Materials (Basel)*. **9**:1-15.
10. Karacasu, M. (2016). Yol Üstyapı Deneyleri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Yayınları, Eskişehir, 207s.
11. Keskin, M. (2011). Superpave ve Marshall dizayn yöntemleri ile üretilmiş asfalt numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki farklılıkların belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 280s.



## Farklı Duvar ve Yakıt Tiplerinde Optimum Yalıtım Kalınlığının Isıtma ve Soğutmada Tespiti ve Çevresel Etkileri

**Hakan Karakaya**

Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 72100 BATMAN  
hakan.karakaya@batman.edu.tr

(Geliş/Received:13.03.2018; Kabul/Accepted:06.09.2018)

### Özet

Gelişen teknoloji ve artan nüfus, enerjiye olan talebi günden güne artırmaktadır. Bu durum Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeleri zorunlu enerji tasarrufuna yöneltmiştir. Yapılarda enerji israfı için kullanılan en etkin yöntemlerden biri ısı yalıtımıdır. Bu çalışmada dört farklı duvar tipi (tuğla, izo-tuğla, bims blok ve gaz beton) için farklı yakıt (doğalgaz, kömür, fuel-oil ve elektrik) ve yalıtım (xps ve eps) türleri kullanılarak ısıtmada ve soğutmada optimum yalıtım kalınlığı, toplam maliyet, enerji tasarrufu, geri ödeme süresi ve çevresel analizi yapılmıştır. Yıllık kazanç oranı optimum noktada yalıtımsız duruma göre ısıtmada sırasıyla % 38.20, % 55.31, % 30.19 ve % 85.10 iken soğutmada % 54.52, % 75.62, % 43.76 ve % 98.92 olmuştur. Geri ödeme süresi ısıtmada sırasıyla 2 yıl, 3,11 yıl, 1,54 yıl ve 5,88 yıl olurken soğutmada 3,03 yıl, 4,68 yıl, 2,30 yıl ve 8,79 yıl değerlerini almıştır. Çevreye salınan CO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> emisyonlarında yalıtımsız duruma oranla optimum noktada % 77,30 civarında azalma gözlenerek kayda değer miktarda fayda sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yalıtım, Çevresel Analiz, Enerji Tasarrufu, Geri Ödeme Süresi, İklim Bölgeleri

## Detecting The Optimum Insulation Thickness For Different Wall And Fuel Types For Heating And Cooling And The Environmental Effects

### Abstract

The developing technology and growing population have been increasing the demand for energy day by day. This situation has put the developing countries such as Turkey. One of the most effective methods used to prevent wasting the energy in buildings is thermal insulation. In this study, the analysis of the optimum insulation thickness for heating and cooling, total cost, energy saving, payback period and environmental factors were carried out using different types of fuel (natural gas, coal, fuel oil, and electricity) and insulation types (xps and eps) for four different wall types (brick, iso-brick, BIMS block and gas concrete). The annual gain rates at the optimum point when compared to the case of no insulation in heating are 38.20%, 55.31%, 30.19% and 85.10%, respectively, and 54.52%, 75.62%, 43.76% and 98.92% in the cooling. The payback periods were 2 years, 3.11 years, 1.54 years and 5.888 years in heating and 3.03 years, 4.68 years, 2.30 years and 8.79 years in cooling respectively. CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> emissions released to the environment have been observed to decrease by about 77.30% at the optimum point compared to the uninsulated state, and a significant amount of benefit has been achieved.

**Keywords:** Insulation, Environmental Analysis, Energy Saving, Payback Period, Climate Zones

### 1.Giriş

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde gelişen teknoloji, nüfus artışı beraberinde enerji talebini arttırmaktadır ve bu durumla doğaya zarar vermeden kalkınmalarının imkansız olmasıdır [1]. Endüstrileşmekte olan ülkelerde enerjinin büyük oranda fosil kaynaklar

kullanılarak elde edildiği göz önüne alınırsa, artan enerji ihtiyacı da atmosfere salınan CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> gibi zararlı emisyonların artışına sebep olmaktadır. Bu olumsuz durumunun etkilerini azaltmak için ya rüzgar, güneş, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına ya da doğrudan enerji tasarrufuna yönelmek gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek yatırım

maliyetleri nedeniyle gelişmemiş ve gelişmekte olan ülkeler için en ucuz enerji kaynağına yönelmek yani israftan kaçınmak önem arz etmektedir.

## 2.Çalışmanın Önemi

Enerji tasarrufu sağlamak ve CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> gibi zararlı emisyon oranlarını azaltmak için tercih edilebilecek en pratik ve ekonomik yollardan biri de yalıtım uygulamalarıdır. Yalıtımla elde edilen tasarrufla, kullanıcılara ve dolayısıyla da ülke ekonomisine artı bir kazanç olacaktır. Fakat kullanılan fosil kaynaklı yakıt türüne, yalıtım malzemesine, iklim özelliklerine ve toplam maliyete bağlı olarak uygulanacak yalıtım kalınlığı da değişim göstermektedir. Bu yüzden araştırmacılar iklimsel özellikleri ve toplam maliyeti göz önüne alarak, kullanılan yakıt ve yalıtım malzemesine göre optimum yalıtım kalınlığı belirleme çalışmaları yapmışlardır.

Binalarda optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi için yapılan önceki çalışmalar şu şekildedir; Kaynaklı ve ark. [2] İstanbul ili için optimum yalıtım kalınlığını ısıtma sezonunda doğalgaz, soğutma sezonunda elektrik kullanılması durumunda sırasıyla 0,4 m ve 0,26 m olarak hesaplanmışlar ve toplam tasarruf oranını ısıtmada %40, soğutmada %28 olarak belirlemişlerdir. Ertürk [3] Ankara ili (Türkiye) için yakıt olarak doğalgaz ve yalıtım için xps'e ilave olarak 4 mm hava boşluğu kullanıldığında, optimum yalıtım kalınlığının 0.092 m'den 0.034 m'ye düştüğünü ve toplam maliyetin %28 oranında azaldığını belirtmiştir. Bolattürk [4] Türkiye'nin 4 farklı iklim bölgesinden 16 şehir seçerek farklı yakıt türleri ve iklim bölgeleri için optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve geri ödeme süreleri üzerine araştırma yapmıştır. Yakıt olarak kömür, doğalgaz, dizel, lpg, elektrik ve yalıtım malzemesi olarak strafor kullanmış ve farklı iklim bölgeleri ve yakıt türüne bağlı olarak optimum yalıtım kalınlığının 2-17 cm arasında, enerji tasarrufunun %22-79 arasında ve geri ödeme süresinin 1,3-4,5 yıl arasında değiştiğini belirtmiştir. Kallioğlu ve ark. [5] Diyarbakır ili (Türkiye) için yapmış olduğu çalışmada örnek tuğla duvar için yakıt olarak doğalgaz, kömür ve

fuel-oil yalıtım malzemesi olarak xps ve eps kullanmışlardır. Yalıtım kalınlıkları 0.0675 m ile 0.0825 m arasında, yıllık tasarruf %62,16 ile %73,06 arasında değiştiğini ve emisyon miktarın %76 ile %85 arasında azaldığını tespit etmiştir. Yuan ve ark. [6] Çin'in 32 farklı bölgesinde iki farklı duvar ve üç farklı yakıtta yapmış olduğu çalışmada optimum şartlarda CO<sub>2</sub> oranında %63'lük düşüş tespit etmiştir. Işık ve Tuğan [7] Tunceli, Hakkâri ve Kars illeri (Türkiye) bölgesinde farklı yalıtım malzemesi ve değişken ısıtma derece-gün değerleriyle iller için optimum kalınlığın illeri için sırasıyla 0,079 m, 0,082 m ve 0,1040 m bulunmuştur. Ayrıca Türkiye için ideal yalıtım kalınlığının 0,028 m ve 0,096 m arasında değiştiği belirlenmiştir.

Diğer çalışmalar incelendiğinde temel amaç optimum yalıtım kalınlığının tespitini yapmak ve o noktadaki ekonomik, çevresel ve yapıdaki yarar ve beklentileri analiz etmek üzerinedir [8-14]. Önceki çalışmalardan da görüleceği üzere binalara uygulanabilecek optimum yalıtım kalınlıklarının hesaplanması, hem enerji tasarrufu hem de toplam maliyeti minimuma indirmek amacıyla enerji tasarrufu için önem kazanmıştır.

## 3.Yöntem

Bu çalışmadaki hesaplamalar Türkiye iklim coğrafyasında 2.bölgedeki Batman ili için yapılmıştır. Hesaplamalarda ısıtma derece gün değeri  $T \leq 15 \text{ C}^0$  ve soğutma derece gün değeri  $T > 22 \text{ C}^0$  alınarak dış duvardaki ısı kayıpları ve buna bağlı enerji ihtiyaçları tespit edilmiştir [15]. ısıtma ve soğutma gün derecesi verileri 2008-2017 yılları arasındaki ortalama yıllık değerler kullanılmıştır ve tablo 1'de gösterilmiştir. Bölgenin ısıtma-soğutma değerleri sırasıyla 1893 (hdd) ve 808 (cdd) olmaktadır.

Hesaplamalarda ömür maliyet analizi (LLCA) kullanılarak ısıtma için kömür, doğalgaz ve fueloil kullanılırken soğutma da elektrik kullanılmıştır. Optimum noktanın tespiti mevcut piyasada en çok kabul gören iki farklı yalıtım malzemesine (ekstrüde polistiren (xps) foamboard ve ekspande polistiren (eps) izopor) göre analiz edilmiştir.

**Tablo 1.** Batman ilinin ısıtma ve soğutma değerleri

		Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam
2017	hdd	513	488	242	130	10	-	-	-	-	26	232	378	2019
	cdd	-	-	-	-	6	122	277	255	117	1	-	-	778
2016	hdd	517	284	252	67	10	-	-	-	-	7	314	461	1912
	cdd	-	-	-	-	9	137	282	295	75	-	-	-	798
2015	hdd	474	337	284	141	-	-	-	-	-	12	249	473	1970
	cdd	-	-	-	-	6	128	281	269	153	7	-	-	844
2014	hdd	453	328	203	75	-	-	-	-	-	28	270	354	1711
	cdd	-	-	-	-	17	141	282	280	109	7	-	-	836
2013	hdd	461	307	242	92	21	-	-	-	-	49	209	637	2018
	cdd	-	-	-	-	3	122	266	237	74	7	-	-	709
2012	hdd	423	417	395	63	-	-	-	-	-	7	156	385	1846
	cdd	-	-	-	-	7	173	275	263	116	20	-	-	854
2011	hdd	425	347	268	122	25	0	-	-	0	62	352	483	2084
	cdd	-	-	-	-	2	112	280	244	78	-	-	-	716
2010	hdd	352	295	192	80	12	0	-	-	0	10	230	342	1513
	cdd	-	-	-	-	24	188	304	291	141	-	-	-	948
2009	hdd	522	304	279	167	37	-	-	-	4	11	234	316	1874
	cdd	-	-	-	-	7	126	257	208	69	-	-	-	667
2008	hdd	584	422	152	66	13	-	-	-	-	22	235	490	1984
	cdd	-	-	-	23	25	179	289	292	129	-	-	-	937

### 3.1 Bina duvarlarının modeli

Yapılarda görülen ısı kayıplarının en fazla olduğu alanlar duvar, döşeme, çatı, pencere ve ısı köprüleri gibi yapı elemanlardır. Bu alanlardaki ısı kayıpları yapının mimarisine, konumuna, ısı yalıtım durumuna ve yapı malzemesine göre farklılık göstermektedir. Günümüzde duvarlar; tek bir katmandan oluşabildiği gibi, bünyesinde yalıtım malzemesi barındıran, birden fazla

katmandan oluşan bir yapı elemanı olarak da ele alınabilmektedirler. Bu çalışmada optimum yalıtım kalınlığının tespitinde sadece dış duvarlardan ısı kaybı meydana geldiği varsayılarak hesaplama yapılmıştır. Çalışmada kullanılan duvar bileşenleri alçı iç sıva, duvar tipi, yalıtım malzemesi ve çimento harçlı dış sıva şeklinde olmaktadır. Bu duvar bileşenlerine ait özellikler tablo 2’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Çalışmada kullanılan duvar yapısı

Duvar Tipi	Duvar Yapısı	Kalınlık (m)	k (W/m.K)	R (m <sup>2</sup> K/W)	R duvar (m <sup>2</sup> K/W)
Tuğla Duvar	Alçı İç Sıva	0,02	0,51	0.0392	0.6837
	Yatay Delikli Tuğla	0,135	0,33	0.4019	
	Çimento Harçlı Dış Sıva	0,02	0,87	0.0230	
	R iç	-	-	0.1670	
	R dış	-	-	0.0454	
İzo Tuğla Duvar	Alçı İç Sıva	0,02	0,51	0.0392	1.0663
	İzo Tuğla Duvar	0,19	0,24	0.7917	
	Çimento Harçlı Dış Sıva	0,02	0,87	0.0230	
	R iç	-	-	0.1670	
	R dış	-	-	0.0454	
Bims Blok Duvar	Alçı İç Sıva	0,02	0,51	0.0392	0.5246
	Bims Blok	0,15	0,60	0.2500	
	Çimento Harçlı Dış Sıva	0,02	0,87	0.0230	
	R iç	-	-	0.1670	
	R dış	-	-	0.0454	
Gazbeton Duvar	Çimento Harçlı İç Sıva	0,02	0,51	0.0392	2.0438
	Gazbeton	0,23	0,13	1.7692	
	Çimento Harçlı Dış Sıva	0,02	0,87	0.0230	
	R iç	-	-	0.1670	
	R dış	-	-	0.0454	

Tipik bir duvar için toplam ısı geçiş katsayısını ifade eden  $U$  ( $W/m^2K$ ) eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır.

$$U = \frac{1}{R_i + R_w + R_{izo} + R_o} \quad (1)$$

1 no.lu denklemdeki  $R_i$  ve  $R_o$  sırasıyla iç ve dış yüzeyin ısı direncini,  $R_w$  yalıtımsız duvar tabakasının ısı direncini ve  $R_{izo}$  ise yalıtım malzemesinin ısı direncini belirtmekte olup 2 nolu denklemle hesaplanmaktadır. Bu denklemdeki  $x$  yalıtım malzemesinin kalınlığı ve  $k$  ise yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısıdır. Bu çalışmada kullanılan yalıtım malzemesi özellikleri tablo 3 de verilmiştir [16].

$$R_{izo} = \frac{x}{k} \quad (2)$$

**Tablo 3.** Yalıtım malzemesi özellikleri

Yalıtım Malzemesi	k (W/mK)	Maliyet (\$/m <sup>3</sup> )
Extruded polystyrene (XPS)	0,040	42.19
Expanded polystyrene (EPS)	0,030	85.37

### 3.2 Bina duvarları için ısıtma yükü

Binalardaki en yüksek ısı kayıpları genellikle dış ortamla temas halindeki duvarlardan, pencerelerden, tavan ve döşemelerden olmaktadır. Bu çalışmada ise hesaplamalar sadece dış duvarlardan meydana geldiği varsayılarak yapılmış ve güneş ışınımı değerleri katılmamıştır. Dış duvarın birim yüzeyinden gerçekleşen ısı kaybı aşağıdaki 3 no.lu eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır [17 ve 18].

$$q = U \cdot \Delta T \quad (3)$$

3 No.lu denklemdeki  $U$  ( $W/m^2K$ ) toplam ısı geçiş katsayısıdır. Birim yüzeyden meydana gelen yıllık ısı kaybı  $U$  ve derece gün sayısı (dgs) kullanılarak 4 no.lu eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$q_A = 86400 \cdot DGS \cdot U \quad (4)$$

Isıtma için gerekli olan yıllık enerji ihtiyacı  $E_A$  ( $J/m^2$ -yıl), yıllık birim ısı kaybının sistem verimine bölünmesiyle 5 no.lu denklemle elde edilir.

$$E_A = \frac{86400 \cdot DGS \cdot U}{\eta} = \frac{86400 \cdot DGS}{(R_{TW} + R_{izo}) \cdot \eta} \quad (5)$$

Tüketilen yıllık yakıt miktarı  $m_{fA}$  ( $kg/m^2$ -yıl) 6 no.lu bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$m_{fA} = \frac{86400 \cdot DGS}{(R_{izo} + x_y/k_y) \cdot H_u \cdot \eta} \quad (6)$$

Birim alanı ısıtmak için kullanılan yıllık enerji maliyeti  $C_{A,H}$  ( $$/m<sup>2</sup>-yıl) eşitlik 7 kullanılarak hesaplanmaktadır.$

$$C_{A,H} = \frac{86400 \cdot HDD \cdot C_f}{(R_{TW} + R_{izo}) \cdot \eta \cdot H_u} \quad (7)$$

Birim alanı soğutmak için kullanılan enerji maliyeti eşitlik 8 yardımıyla hesaplanmaktadır denklemdeki COP soğutma sisteminin performans katsayısını ifade etmektedir [19]. Bu çalışmada 2,5 olarak alınmıştır. Burada  $H_u$  ( $J/kg$ ;  $J/m^3$ ;  $J/kWh$ ) yakıtın alt ısı değerini,  $\eta$  yakıtın verimi ve  $C_f$  ( $$/kg$ ;  $$/m<sup>3</sup>) yakıtın fiyatı olup Tablo 4 de gösterilmiştir [20].$

$$C_{A,C} = \frac{86400 \cdot CDD \cdot C_f}{(R_{TW} + R_{izo}) \cdot COP} \quad (8)$$

**Tablo 4.** Çalışmada kullanılan yakıtların özellikleri

Yakıt	$C_f$	$H_u$	$\eta$	Kimyasal Formülü
Kömür(Soma)	0,172710 \$/kg	19,794 x 10 <sup>6</sup> J/kg	0,65	C <sub>5.85</sub> H <sub>5.26</sub> O <sub>1.13</sub> S <sub>0.008</sub> N <sub>0.077</sub>
Doğalgaz	0,280616 \$/m <sup>3</sup>	34,526 x 10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup>	0,93	C <sub>1.05</sub> H <sub>4</sub> O <sub>0.034</sub> N <sub>0.022</sub>
Fuel-Oil	0,817532 \$/kg	41,317 x 10 <sup>6</sup> J/kg	0,80	C <sub>7.3125</sub> H <sub>10.407</sub> O <sub>0.04</sub> S <sub>0.026</sub> N <sub>0.02</sub>
Elektrik	0,125293 \$/kWh	3,5990 x 10 <sup>6</sup> J/kWh	0,99	-

### 3.3 Optimum yalıtım hesabı

Binanın ihtiyaç duyduğu optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesiyle yalıtım maliyetinin minimum seviyede tutulması amaçlanmaktadır. Maliyet hesabında çeşitli metotlar olmakla birlikte, bu çalışmada ömür maliyet analizi hesabı kullanılmıştır. Binaın toplam ısıtma maliyeti, enerji maliyeti, varsa yalıtım maliyeti, gelecek değer faktörü olarak nitelendirilen (pwf) bir parametre ve belirlenen bir zaman periyoduna (N) göre hesap edilir. pwf değerinin hesabında kullanılan r gerçek faiz oranı enflasyon oranı (g) ve faiz oranına (i) bağlı olarak 9 no.lu denklemle iki ayrıık duruma göre hesap edilmektedir [21 ve 22].

$$\text{eğer } i > g \text{ ise } r = \frac{i-g}{1+g}; \text{ Eğer } g > i \text{ ise } r = \frac{g-i}{1+i} \quad (9)$$

Bu çalışmadaki hesaplamalarda on yıllık süreç baz alınmış, faiz oranı %9,25 ve enflasyon oranı %10,35 gibi güncel değerleriyle hesaplamalar yapılmış ve gelecek değer faktörü 10 no.lu denklemle hesaplanmıştır.

$$PWF = \frac{(1+r)^N}{r \cdot (1+r)^N} \quad (10)$$

Yalıtımı yapılmış bir binanın toplam maliyeti  $C_T$  (\$) 11 no.lu eşitlikle hesaplanmaktadır. Burada  $C_i$  yalıtım malzemesinin birim fiyatı (\$/m<sup>3</sup>) ve  $x$  (m) yalıtım malzemesinin kalınlığıdır.

$$C_T = C_A \cdot PWF + C_i \cdot x \quad (11)$$

Optimum yalıtım kalınlığının hesaplanmasında toplam maliyetin minimum düzeyde olması gerekmektedir. Toplam maliyeti veren 10 no.lu denklemin yalıtım kalınlığı ( $x$ )'e göre türevi alınarak 12 no.lu bağıntıyla hesaplanmaktadır.

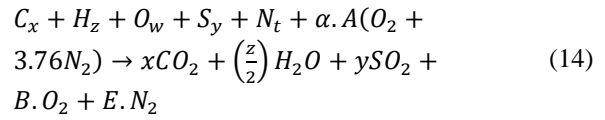
$$x_{op} = 293.94 \cdot \left( \frac{DGS \cdot C_f \cdot PWF \cdot k}{H_u \cdot C_i \cdot \eta} \right)^{\frac{1}{2}} - k \cdot R_{TD} \quad (12)$$

Yapılan yatırımdan elde edilen kazanç sonrası geri ödeme süresinin hesaplanmasında 13 no.lu denklem kullanılmaktadır. Bu denklemdeki  $S_A$  yıllık tasarruf olup yalıtımsız duvar ile yalıtım duvarın yıllık enerji maliyeti arasındaki farktır.

$$p_b = \frac{C_T}{S_A} \quad (13)$$

### 3.4 Çevresel analiz

Enerji gereksiniminde kullanılan fosil kökenli yakıtlar atmosferdeki zararlı emisyon miktarını arttırarak ekolojik dengenin bozulmasına sebebiyet vermektedir. Konutlarda artan yalıtım kalınlığıyla azalacak ısıtma giderleriyle bu soruna bir nebze çözüm olunabilir. Yakıt için yanmanın genel formülü 14 no.lu bağıntıdaki gibidir [5, 17, 23].



Oksijen denge şartından A,B ve E sabitleri aşağıdaki 15,16 ve 17 no.lu denklemlerle hesaplanmaktadır.

$$A = \left(x + \frac{z}{4} + y - \frac{w}{2}\right) \quad (15)$$

$$B = (\alpha - 1) \cdot \left(x + \frac{z}{4} + y - \frac{w}{2}\right) \quad (16)$$

$$E = 3.76\alpha \left(x + \frac{z}{4} + y - \frac{w}{4}\right) + \frac{t}{2} \quad (17)$$

SO<sub>x</sub> ve CO Emisyonları denklem 1 de ihmal edilmiştir. Yıllık yakıt tüketimine bağlı olarak emisyon değerleri 18 no.lu ve 19 no.lu eşitlikle hesaplanabilir.

$$mCO_2 = \frac{44 \cdot x}{M} m_{fA} \quad (18)$$

$$mSO_2 = \frac{64 \cdot x}{M} m_{fA} \quad (19)$$

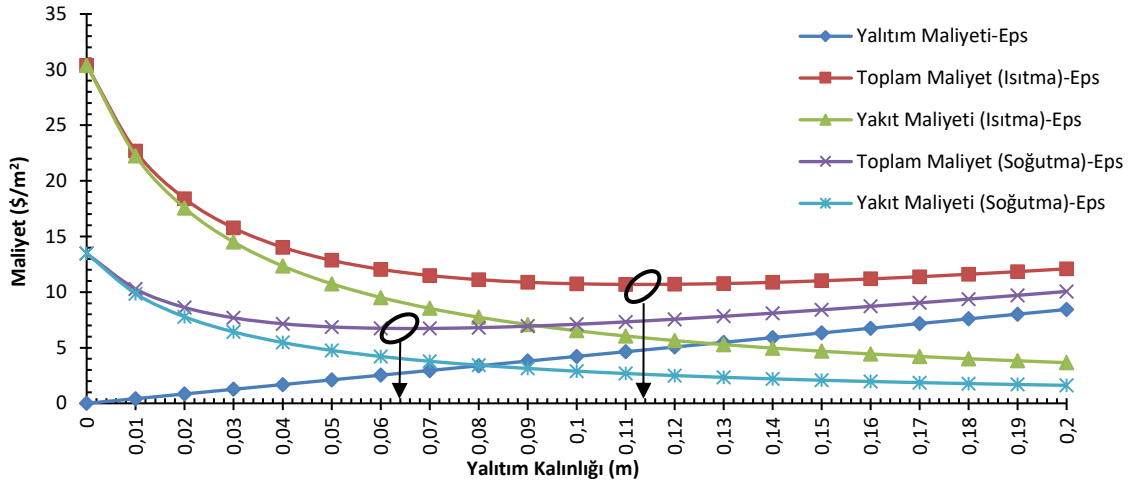
17. ve 18. Eşitlikteki M yakıtın mol ağırlığı olup 20 no.lu bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$M = 12x + z + 16w + 32y + 14t \quad (20)$$

#### 4.Bulgular Ve Tartışma

Bu çalışmada hesaplanan optimum yalıtım kalınlığı değeri, duvar tipine, yakıt türüne ve yalıtım malzemesine göre değişiklik göstermektedir. Binaların dış duvarlarına yapılan ısı yalıtımı meskenden dış ortama gerçekleşen ısı kaybını ve dolayısıyla mahallin ısıtma veya soğutma yükünü azaltır. Bu durum direk olarak

tüketilen yakıt sarfiyatında ve dolaylı olarak da salınan zararlı gazların miktarının azalmasında önemlidir. Yalıtım uygulaması hesabında kullanılan toplam maliyet değeri tüketilen yakıt ve yalıtım malzemesi birim fiyatından oluşmaktadır. Her ne kadar artan yalıtım kalınlığı tüketilen enerji miktarının azalmasında olumlu etken olsa da bu durum bir noktadan sonra toplam maliyeti arttırmaktadır. Bu artış, optimum yalıtım kalınlığına kadar orantılı bir şekilde devam etmektedir. Bu değerden sonraki lüzumsuz yalıtım kalınlığı kazanılan ısı yükünü karşılayamayıp toplam maliyeti arttırmaktadır. Toplam maliyetin minimum olduğu değer bize uygun yalıtım kalınlığını verecektir.



Şekil 1. Eps malzemesinin tuğla duvarda ısıtma ve soğutmada kullanım durumunda maliyet kalınlık ilişkisi

Şekil 1’de optimum noktanın tespitinde toplam maliyetin minimum olduğu noktalar ısıtma ve soğutma için görülmektedir. Batman iklim şartlarında tuğla duvarın kullanılmasıyla optimum yalıtım kalınlıkları ısıtma (kömür) ve soğutmada (elektrik) sırasıyla 0,1130 m ve 0,0661 m olmuştur. Optimum noktadan sonra artan yalıtım kalınlığı ile toplam maliyette artış eğilimi gözlenebilmektedir. Dört farklı duvar tipi

için (Tuğla, İzo-Tuğla, Bims-Blok ve Gazbeton) yalıtım kalınlığının toplam maliyeti, yakıt maliyeti ve yalıtım maliyeti üzerindeki etkisi, dıştan yalıtımlı duvar uygulamalarına göre Şekil 3 ve 4’te gösterilmiştir. Değişik yakıt türleri ve farklı yalıtım malzemeleri için, optimum yalıtım kalınlığı (12) no.lu denklem kullanılarak hesaplanmıştır. Optimum noktada kaydedilen değerler Tablo 5, 6, 7 ve 8 de gösterilmiştir.

Tablo 5. Tuğla duvar için hesaplanan değerler

Malzeme	Extruded polystyrene (xps)				Expanded polystyrene (eps)			
	Isıtma		Soğutmada		Isıtma		Soğutmada	
Metot								
Yakıt Tipi	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	Elektrik
X <sub>opt</sub> (m)	0,0485	0,0651	0,0956	0,0364	0,0859	0,1130	0,1632	0,0661
Geri Ödeme Süresi(yıl)	2,76	2,23	1,65	3,34	2,25	1,82	1,34	2,72
Yıllık Kazanç (\$/m <sup>2</sup> )	9,78	17,57	37,98	5,51	11,39	19,71	41,09	6,74
Yıllık Kazanç Oranı (%)	50,58	42,20	32,20	59,06	42,45	35,17	26,64	49,98

**Tablo 6.** İzo-tuğla duvar için hesaplanan değerler

Malzeme	Extruded polystyrene (xps)				Expanded polystyrene (eps)			
	Isıtmada		Soğutmada		Isıtmada		Soğutmada	
Metot								
Yakıt Tipi	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	Elektrik
X <sub>opt</sub> (m)	0,0371	0,0536	0,0842	0,0250	0,0706	0,0977	0,1479	0,0508
Geri Ödeme Süresi(yıl)	4,27	3,46	2,56	5,16	3,49	2,82	2,09	4,21
Yıllık Kazanç (\$/m <sup>2</sup> )	3,66	7,64	18,86	1,66	4,94	9,45	21,64	2,55
Yıllık Kazanç Oranı (%)	71,19	60,79	47,50	80,79	61,12	51,53	39,75	70,46

**Tablo 7.** Bims blok duvar için hesaplanan değerler

Malzeme	Extruded polystyrene (xps)				Expanded polystyrene (eps)			
	Isıtmada		Soğutmada		Isıtmada		Soğutmada	
Metot								
Yakıt Tipi	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	Elektrik
X <sub>opt</sub> (m)	0,0533	0,0698	0,100	0,0412	0,0923	0,1194	0,1696	0,0724
Geri Ödeme Süresi(yıl)	2,12	1,72	1,27	2,57	1,73	1,40	1,03	2,09
Yıllık Kazanç (\$/m <sup>2</sup> )	15,38	26,39	54,56	9,19	17,13	28,66	57,81	10,55
Yıllık Kazanç Oranı (%)	40,39	33,40	25,26	47,64	33,62	27,66	20,81	39,88

**Tablo 8.** Gazbeton duvar için hesaplanan değerler

Malzeme	Extruded polystyrene (xps)				Expanded polystyrene (eps)			
	Isıtmada		Soğutmada		Isıtmada		Soğutmada	
Metot								
Yakıt Tipi	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	Elektrik
X <sub>opt</sub> (m)	0,0077	0,024	0,0548	-0,0044	0,0315	0,0586	0,1088	0,0117
Geri Ödeme Süresi(yıl)	8,03	6,53	4,85	9,66	6,58	5,34	3,96	7,92
Yıllık Kazanç (\$/m <sup>2</sup> )	0,08	0,82	4,18	0,03	0,5131	1,7739	6,11	0,07
Yıllık Kazanç Oranı (%)	98,75	91,97	77,71	99,41	92,25	82,5579	67,40	98,44

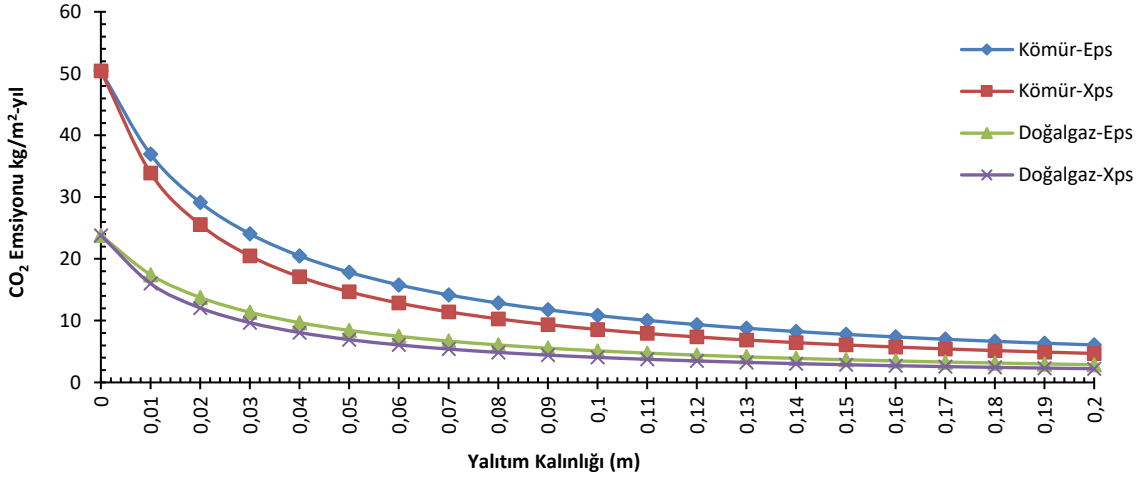
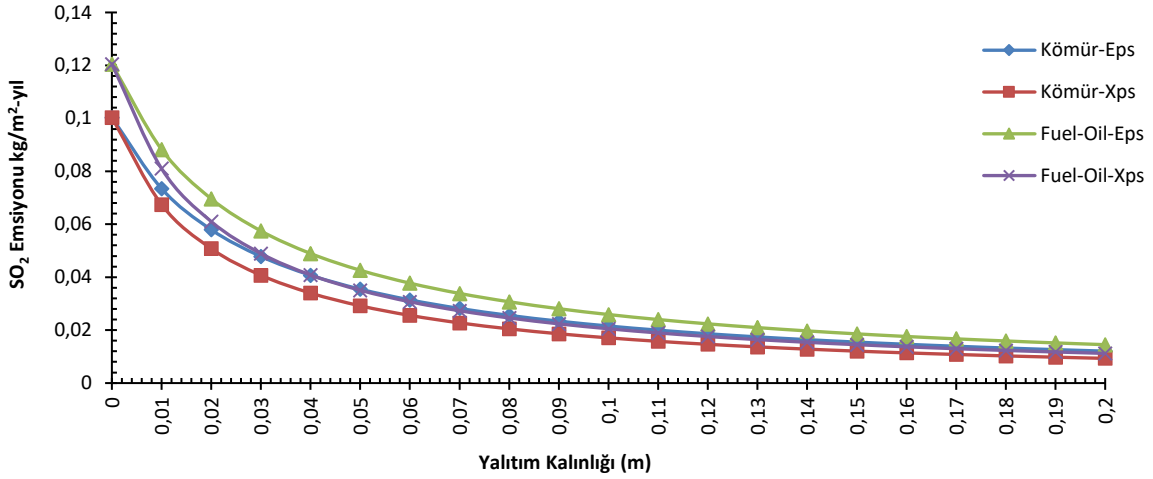
Tablo 5, 6, 7 ve 8 incelendiğinde farklı duvar tiplerine göre optimum yalıtım kalınlığı ısıtmada (doğalgaz, kömür ve fuel-oil) ve soğutmada (elektrik) kullanılmasıyla ve yalıtım malzemelerine (extruded polystyrene and expanded polystyrene) göre farklılıklar göstermektedir.

Bina yalıtımında extruded polystyrene (xps) ve Expanded polystyrene (eps) malzemesinin ısıtmada kullanılmasında en düşük optimum ısı yalıtım kalınlığı gazbeton duvarda hesaplanmıştır. Bu değerler sırasıyla doğalgazda 0,0077 (m)- 0,0315 (m), kömürde 0,0240 (m)- 0,0586 (m) ve fuel-oil de 0,0548 (m)- 0,1088 (m) değerini almıştır. En yüksek yalıtım kalınlığı değerleri ise bims blok duvarda hesap edilmiş ve sırasıyla doğalgazda 0,0533 (m)- 0,0923 (m), kömürde 0,0698 (m)- 0,1194 ve fuel-oilde 0,100 (m)- 0,1696 değerini almıştır. Yalıtımın bina soğutulmasında kullanılması durumunda ısıtmayla benzer değerler gözlenmiştir. Yalıtımda xps ve eps malzemesinin kullanılmasında en düşük değer gazbeton duvarda sırasıyla -0,0044 (m)- 0,0117 (m) en yüksek değer ise bims blok duvarda sırasıyla 0,0412 (m)- 0,0724 (m) olmaktadır.

xps malzemesi için ısıtmada kullanılan enerjinin yüzde 99,41 ile 25,26 değerleri arasında değişen miktarlarda geri kazanılırken EPS malzemesi kullanımında yüzde 98,44 ile 20,81 değerleri arasında değişen miktarlarda geri kazanılmıştır.

Yapılan yalıtımın kazanılan enerji ile ilişki olarak amortisman süresi on yıllık zaman periyoda bağlı hesaplandığında xps malzemesinde 1,27 (yıl) ile 9,66 (yıl) arasında değişmektedir. eps malzemesinin 1,03 (yıl) ile 7,92 (yıl) arasında değişiklik göstermektedir. Amortisman süresini etkileyen temel göstergeler arasında faiz ve enflasyon oranları, yalıtım malzemesini birim fiyatı ve yıllık ısı gereksinimi olarak nitelendirebiliriz.

Yıllık CO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> gazlarının yalıtım kalınlığına bağlı değişimleri şekil 5 ve 6 da gösterilmiştir. Yıllık yakıt tüketimi ile yalıtım kalınlığına ters orantılı olup yalıtım kalınlığı arttıkça çevreye salınan zararlı gazların emisyon değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Bu düşüşteki belirginlik yalıtım malzemesine cinsine göre farklılık göstermekte ve artan yalıtım kalınlığıyla belirginlik kaybolmakta ve durağan bir hal almaktadır.

Şekil 2. Yalıtım kalınlığı ve CO<sub>2</sub> baca gazı emisyonu ilişkisiŞekil 3. Yalıtım kalınlığı ve SO<sub>2</sub> baca gazı emisyonu ilişkisi

## 5.Sonuçlar ve Öneriler

Yapılan çalışmada Türkiye’de uygulama alanına sahip farklı duvar modelleri ve yakıt türleriyle 2.Bölgede yer alan Batman ili için bina ısıtılmasında ve soğutulmasındaki optimum yalıtım kalınlığı değerleri, yıllık kazançlar, geri ödeme süreleri ve çevresel analizler yapılmıştır.

Ortaya konulan sonuçlar neticesinde aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir.

1-Yapıda tuğla duvar kullanımında ortalama değerler ısıtma ve soğutmada sırasıyla yalıtım kalınlığı 0.0952 m, 0.0512 m; geri ödeme süresi 2.00 yıl, 3.03 yıl; yıllık kazanç 22.92 \$/m<sup>2</sup>, 6.12 \$/m<sup>2</sup> ve yıllık kazanç oranı % 38.20, % 54.52 olmaktadır.

2-Yapıda izo-tuğla duvar kullanımında ortalama değerler ısıtma ve soğutmada sırasıyla yalıtım kalınlığı 0.0818 m, 0.0379 m; geri ödeme süresi 3.11 yıl, 4.68 yıl; yıllık kazanç 11.03 \$/m<sup>2</sup>, 2.10 \$/m<sup>2</sup> ve yıllık kazanç oranı % 55.31, % 75.62 olmaktadır.

3-Yapıda bims beton duvar ortalama değerler ısıtma ve soğutmada sırasıyla yalıtım kalınlığı 0.1007 m, 0.0568 m; geri ödeme süresi 1.54 yıl, 2.33 yıl; yıllık kazanç 33.32 \$/m<sup>2</sup>, 9.87 \$/m<sup>2</sup> ve yıllık kazanç oranı % 30.19, % 43.76 olmaktadır.

4- Yapıda gaz beton duvar ortalama değerler ısıtma ve soğutmada sırasıyla yalıtım kalınlığı 0.0475 m, 0.0036 m; geri ödeme süresi 5.88 yıl, 8.79 yıl; yıllık kazanç 2.24 \$/m<sup>2</sup>, 0.05 \$/m<sup>2</sup> ve yıllık kazanç oranı % 85.10, % 98.92 olmaktadır.



5- Gaz beton duvarın düşük ısı iletkenliğinden dolayı optimum yalıtım kalınlığı neredeyse yok denecek kadar düşüktür. Bu sebeple 2. İklim bölgesinde gaz beton duvar için yalıtımın işçilik ve kurulum masrafları da dikkate alındığında ihtiyaç duyulmamaktadır.

6-Bims beton duvarın 2. iklim bölgesinde kullanımında yalıtımın uygulaması enerji tasarrufu ve çevresel zarar en aza indirgenmesinde elzemdir.

7-Çevresel analizler açısından optimum yalıtım kalınlığı değerlerinde CO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> emisyonunda yalıtımsız duruma göre % 77.30 oranında azalma gerçekleştirilerek çevreci yaşanabilir bir ekosisteme olanak sağlanabilir.

8-Yapılan analizler ve hesaplanan değerler 2.Bölgede bulunan iller içinde kullanılabilir. Bu iller Adapazarı, Çanakkale, İstanbul, Ordu, Tekirdağ, Adıyaman, Denizli, Kahramanmaraş, Rize, Trabzon, Amasya, Diyarbakır, Kilis, Samsun, Yalova, Balıkesir, Düzce, Kocaeli, Siirt, Zonguldak, Bartın, Edirne, Manisa, Sinop, Gaziantep, Mardin, Şanlıurfa, Bursa, Giresun, Muğla ve Şırnak olmaktadır.

9-Yalıtım malzemeleri kıyaslandığından XPS malzemesi birim fiyatının daha yüksek olmasına rağmen düşük ısı iletkenlik sebebiyle tüm durumlar için EPS malzemesine göre optimum nokta kalınlığı daha düşüktür.

10-Türkiye’de son dönemlerde çok hızlı kentleşme olgusu yaşanmaktadır. Oluşturulan yapılar enerji verimliliği standartlarına göre inşa edilmemektedir. İnşaat ruhsatı vermede yetkin olan kurumların bu konuda bilinçli ve duyarlı olması önemlidir.

Bize göre, bu uygulamaların ve sistemlerin yaygınlaşabilmesi yalıtım malzemesi birim fiyatlarının düşmesi ve insanlığın yaşadığı tabiata sahip çıkmasıyla gerçekleşecektir. İnsan toplumları ısrarcı olmadıkları sürece, enerji ihraç eden ülkelerde maddi kazançlarından asla vazgeçemeyeceklerdir.

## 6. Semboller

$R_i$	:İç Yüzeyin Isıl Direncini
$R_o$	:Dış Yüzeyin Isıl Direncini
$R_w$	:Yalıtımsız Duvar Tabakasının Isıl Direnci

$R_{izo}$	:Yalıtım Malzemesinin Isıl Direnci
$x$	:Yalıtım Malzemesinin Kalınlığı
$k$	:Yalıtım Malzemesinin Isıl İletim Katsayısı
$U$	:Toplam Isı Geçiş Katsayısı ( $W/m^2K$ )
$d_{gs}$	:Derece Gün Sayısı
$h_{dd}$	:Isıtma İçin Geçen Gün Sayısı
$c_{dd}$	:Soğutma İçin Geçen Gün Sayısı
$E_A$	:Isıtma Veya Soğutma İçin Gerekli Olan Yıllık Enerji İhtiyacı ( $J/m^2\cdot yıl$ )
$m_{fA}$	:Tüketilen Yıllık Yakıt Miktarı ( $kg/m^2\cdot yıl$ )
$C_{A,H}$	:Birim Alanı Isıtmak İçin Kullanılan Yıllık Enerji Maliyeti( $\$/m^2\cdot yıl$ )
$H_u$	:Yakıtın Alt Isıl Değeri ( $J/kg$ ; $J/m^3$ ; $J/kwh$ )
$\eta$	:Yakıtın Verimi
$C_f$	:Yakıtın Fiyatı ( $\$/kg$ ; $\$/m^3$ )
$p_{wf}$	:Gelecek Değer Faktörü
$N$	:Belirlenen Bir Zaman Periyodu

## 7.Kaynaklar

1. Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *The American economic review*, 1-28.
2. Kaynaklı, Ö., Kılıç, M., & Yamankaradeniz, R. (2010). Isıtma ve soğutma süreci için dış duvar optimum yalıtım kalınlığı hesabı. *TTMD Isıtma, Soğutma, Havalandırma, Klima, Yangın ve Sıhhi Tesisat Dergisi*, **65**: 39-45.
3. Ertürk, M. (2016). Bina Dış Duvarlarında Farklı Yalıtım Malzemesi ve Hava Boşluğu Kullanımının, Birim Alandaki Enerji Tasarrufu ve Kişi Başı Emisyon Hesaplamalarında Yeni Bir Yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **31** (2).
4. Bolatturk A. (2006) Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey. *Applied Thermal Engineering*; **26(11)**:1301-1309.
5. Kallioğlu, M. A., Zülal, A. R. C. A., Karakaya, H., & Durmuş, A. (2016). Environmental And Economic Analysis Of Optimum Heat Insulation Thickness In Energy Saving. *European Journal Of Technique*, **6** (2): 160-169.
6. Yuan, J., Farnham, C., & Emura, K. (2017). Optimum insulation thickness for building exterior walls in 32 regions of China to save energy and reduce CO<sub>2</sub> emissions. *Sustainability*, **9(10)**: 1711.
7. Işık, E., & Tuğan, V. (2017). Tunceli, Hakkâri ve Kars İllerinin Optimum Isı Yalıtım Kalınlığının

- Hesaplanması. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, **3(2)**: 50-57.
8. Dombaycı, Ö., A. (2007). The environmental impact of optimum insulation thickness for external walls of buildings. *Building and Environment*, **42(11)**: 3855-3859.
  9. Arslan O, Kose R. (2006). Thermoeconomic optimization of insulation thickness considering condensed vapour in buildings. *Energy and Buildings*; **38 (12)**: 1400-1408.
  10. Mahlia TMI, Taufiq BN, Ismail, Masjuki HH. (2007). Correlation between thermal conductivity and the thickness of selected insulation materials for building wall. *Energy and Buildings*, **39(12)**: 182-187.
  11. Hasan A. (1999), Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost. *Applied Energy*, **63(2)**: 115-124.
  12. Gustafsson SI. (2000), Optimization of insulation measures on existing buildings. *Energy and Buildings*; **33(1)**: 49-55.
  13. Al-Khawaji MJ. (2004), Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation. *Applied Thermal Engineering*, **24(17-18)**: 2601-2610.
  14. Wong IL, Eames PC, Perera RS. (2007), A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications. *Solar Energy*, **81(9)**: 1058-1071.
  15. <https://www.mgm.gov.tr>, Isıtma ve Soğutma Gün Dereceleri, 15 Şubat 2018
  16. <http://www.izocam.com.tr>, Yalıtım Birim Fiyatları, 18 Şubat 2018.
  17. Shekarchian, M., Moghavvemi, M., Rismanchi, B., Mahlia, T. M. I., & Olofsson, T. (2012). The cost benefit analysis and potential emission reduction evaluation of applying wall insulation for buildings in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16(7)**: 4708-4718.
  18. Ozel, M. (2011). Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials. *Applied Thermal Engineering*, **31(17-18)**: 3854-3863.
  19. Kurekci, N. A. (2016). Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Turkey's provincial centers. *Energy and Buildings*, **118**: 197-213.
  20. [www.dosider.org](http://www.dosider.org), Yakıt fiyatları, Erişim Tarihi: 30 Ocak 2018.
  21. <http://www.tcmb.gov.tr/>, Faiz ve Enflasyon Oranları, Erişim Tarihi: 20 Ocak 2018
  22. Hasan, A. (1999). Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost. *Applied Energy*, **63(2)**: 115-124.
  23. Yildiz, A., Gurlek, G., Erkek, M., & Ozbalta, N. (2008). Economical and environmental analyses of thermal insulation thickness in buildings. *Journal of Thermal Science and Technology*, **28(2)**: 25-34.

## Seralarda Isıtma Miktarının Yumuşak Hesaplama Teknikleri Kullanılarak Belirlenmesi

Özlem ALPAY<sup>1</sup>, Ebubekir ERDEM<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ

<sup>1</sup>oalpay@firat.edu.tr, <sup>2</sup>aberdem@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 16.03.2018; Kabul/Accepted: 19.05.2018)

### Özet

Bu çalışmada, Elazığ ilinde bulunan bir seranın iklim koşulları dikkate alınarak seranın ısıtma ihtiyacı yumuşak hesaplama teknikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Sera yetiştiriciliğinde ısıtma giderleri üretim maliyetleri içerisinde en önemli unsurdur. Bu nedenle, seralarda ısı ihtiyaçlarının doğru bir şekilde hesaplanması üretim maliyetlerinin düşürülmesi açısından son derece önemlidir. Bu çalışmada, sera içi ısı gereksinimi yapay sinir ağları, bulanık mantık ve ısı kayıp-kazanç yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken ortamın sıcaklığı, nemi, yetiştirilen ürünün özellikleri, seranın bulunduğu bölge, kullanılan malzemeler, gibi faktörler göz önüne alınmıştır. Araştırma sonucunda bulanık mantık ve yapay sinir ağları modelleri kullanılarak ısıtılan seralar, geleneksel yöntem ile ısıtılan seralardan daha düşük miktarda ısı enerjisi ile çalışmaktadır. Yöntemler genel olarak karşılaştırıldığında yapay sinir ağları modeli ile bulanık mantık yöntemi geleneksel ısı kayıp-kazanç yöntemine göre yaklaşık %20 daha az enerji tüketerek seranın ısıtılmasında kullanıcıya ekonomik açıdan avantaj sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Seralar, Isı Gereksinimi, Yapay Sinir Ağları, Bulanık Mantık, Isı Kayıp-Kazanç

## The Determination of Greenhouse Heating Amount by Using Soft Computing Techniques

### Abstract

In this study, the heating requirement of the greenhouse considering the climatic conditions of a greenhouse in Elazığ Province was calculated using soft calculation techniques. Heating costs in greenhouse cultivation are the most important factors in production costs. Therefore, the correctly calculation of heat requirements in greenhouses is extremely important in terms of reducing production costs. In this study, the internal heat requirement of the greenhouse was calculated using artificial neural networks, fuzzy logic and heat loss-gain methods. During these calculations, the temperature of the environment, humidity, characteristics of the product grown, the area where the greenhouse is located, materials used, etc. were taken into consideration. As a result of the research, the greenhouses prepared by using fuzzy logic and artificial neural network models work with heat energy in a lower amount than greenhouses which are heated by traditional method. In comparison with the methods in general, the fuzzy logic technique with the artificial neural network model consumes approximately 20% less energy than the heat loss-gain method which affords the user an economic advantage in heating the greenhouse.

**Keywords :** Greenhouses, Heat Requirement, Artificial Neural Networks, Fuzzy Logic, Heat Loss-Gain

### 1. Giriş

Bitkiler için uygun yetiştirme koşullarının olmadığı alanlarda, üretim ve gelişme şartlarının yapay bir şekilde oluşturulduğu ortamlara sera denir. Seracılık bitki, sebze ve meyvelerin yetiştirilmesini sınırlandıran nedenleri ortadan kaldırdığı için sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Modern bir sera sistemi gerek kurulumu gerekse

kurulum sonrası sürecinde tarım ve biyosistem gibi ürüne yönelik disiplinler ile inşaat yapıları, makine, elektrik elektronik ve bilgisayar gibi seranın çalışma şekline yönelik birden fazla alandan faydalanır.

Günümüz seralarında sensörler, kablolu veya kablosuz haberleşme teknolojileri etkin bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bunların kullanılması etkin bir işletme ortamı oluşturarak

enerji, su, gübre ve zaman gibi çeşitli faktörler üzerinde bir tasarruf sağlayabilmeyi amaçlamaktadır.

Yelmen ve Çakır [1] çalışmalarında, yapay sinir ağlarını kullanarak Mersin il ve ilçelerine ait seralar için birim alanda gerekli olan ısıtma gereksinimlerini analiz etmişlerdir. Yapılan çalışmada, Mersin ilinde bulunan seralarda Levenbergh -Marquardt (LM) eğitim algoritmasına göre farklı ağ yapılarında, enlem, boylam, yükseklik ve ortalama sıcaklık verileri kullanılarak seraların ısıtma ihtiyacı tahmini yapılmıştır. Seraların ısıtılmasında, yapay sinir ağlarının kullanılmasının uygun bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır.

Kendirli [2] yaptığı çalışmada, sera tiplerini ve örtü malzemelerinin özelliklerini dikkate alarak yedi serada bir yıl boyunca on araştırmacının yaklaşımları ile seraların ısı ihtiyaçlarının hesaplamalarını yapmışlardır. Araştırma alanında seralarda yıl boyunca üretim yapılabilmesi için Kasım ayından Nisan ayı ortalarına kadar ısıtma yapılması gerektiğini belirlemişlerdir. Seranın tipi ve kullanılan örtü malzemeleri göz önüne alındığında en fazla ısıtma ihtiyacının Polietilen örtülü seralarda olduğunu gözlemlemişlerdir.

Gürdil ve diğ. [3] geliştirdikleri programla, bazı illerde bulunan domates seraları için ısıtma kapasitelerini hesaplamışlardır.

Baytorun ve diğ. [4] çalışmalarında, Türkiye’de seracılığın yaygın bir şekilde yapıldığı ve ısıtma kaynaklarına göre seracılık potansiyelinin olduğu illerin Isıtma Derece-Gün (HDD, High Degree Day) değerleri ile ISIGER-SERA uzman sistemle saatlik iklim değerlerine göre ısı enerjisi gereksinimi hesaplamışlardır.

Zhou ve diğ. [5] ısı depolayan bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Gündüz alınan güneş enerjisini daha sonra iç hava sıcaklığını yükseltmek için plastik bir seraya uygulamışlardır. Bunun için güneş enerjisi depolama ve ısıtma sisteminin tasarımına yardımcı olmak ve sistem performansını değerlendirmek için tek boyutlu bir dinamik model kurmuşlardır. Matlab’da geliştirilen modelin kullanılmasıyla, farklı yüzeylerin ısı kazanımlarının hesaplanması ve saatlerce ısı depolanması yoluyla plastik serada karakteristik sıcaklıkların tarih-saat değişim modelleri elde edilmiştir. Hesaplanan sonuçlar, ölçülen verilerle iyi bir uyum gösterip, yöntemin

geçerli olduğunu ve seraların termal performans analizi ile güneş enerjisi depolama ve ısıtma sisteminin tasarımına uygulanabileceğini göstermişlerdir.

Cemek [6] yaptığı çalışmada, Samsun il ve ilçelerine ait seralar için aylar, enlem, boylam, yükseklik, ortalama sıcaklık verilerini dikkate alarak birim yüzey ve taban alanları için ısıtma gereksinimlerini yapay sinir ağları (YSA) modelini kullanarak belirlemişlerdir. Bu modelde seralarda ısıtma ihtiyacı olan aylar, enlem, boylam, yükseklik ve ortalama sıcaklık giriş verileri olarak; ısıtma ihtiyacı çıkış verisi olarak kullanılmıştır. Samsun ili ve 8 ilçeye ait olan verilerden 7 ilçe eğitim verisi, Samsun merkez ve Bafra ilçesi test verisi olarak kullanılmıştır. Farklı ağ yapılarında LM eğitim algoritması kullanılarak test ettirilen verilerden ortalama %99’un üzerinde tahmin ( $R^2$ ) değeri elde edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada yapay sinir ağları modeli kullanılarak seraların ısıtma ihtiyacının başarılı bir şekilde tahmin edilmesi sağlanmıştır.

Ayan ve Şenol [7] yapmış oldukları çalışma da, bulanık mantık ve PLC tarafından kontrol edilen, 3G ile uzaktan kontrol edilebilen bir sera otomasyonu gerçekleştirilmiştir. Sera sistemi kendi kendini kontrol eden bir sistem haline getirilerek sera için gerekli tüm şartları PLC tarafından bulanık mantık kurallarına bağlı olarak kontrol edilebilmiştir. Ayrıca sera sistemine eklenen IP kamera ile istenildiği anda herhangi bir akıllı telefon, tablet veya bilgisayar ile bağlanılarak izlenebilmiştir. Uzaktan erişim imkânı sunan yönlendirici, 3G bağlantı özelliği sayesinde sera otomasyonuna kolayca erişilebilmiş ve tüm sistemin bilgisi kolay bir şekilde alınabilmiştir.

Cossu ve diğ. [8] Yaptıkları çalışma da 960 m<sup>2</sup> boyutunda ki domates ekimi yapılmış seranın sıcaklık ve nem dağılımını fotovoltaik (PV) modüller ile değiştirmişlerdir. PV sistemi, PV sistemi olmayan duruma göre, sera içinde güneş ışınımının kullanılabilirliğini % 64 (yıllık bazda 2684 MJ) oranında azaltmıştır.

Bu çalışmada, giriş bölümünde sera ve seraların ısıtılması ile ilgili yapılan çalışmalar sunulmuştur. İkinci bölümde seracılık ve seraların ısıtma sistemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde çalışmada kullanılan bulanık mantık, YSA ve ısı kayıp-kazanç yöntemleri açıklanarak bunların çalışma adımları

detaylı biçimde açıklanmıştır. Dördüncü bölümde çalışmada kullanılan yöntemlerin uygulanması sonucu elde edilen bulgular sunulmuştur. Son bölümde elde edilen sonuçlar yorumlanarak önerilerde bulunulmuştur.

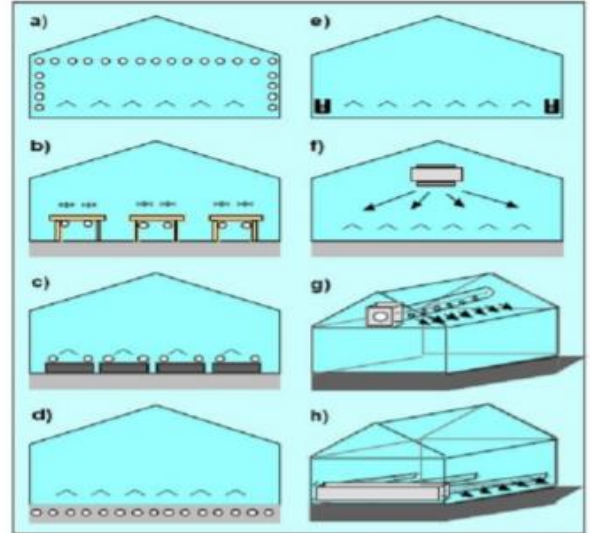
## 2. Sera Sistemleri

Nüfusun beslenme ihtiyacının artması ile gelir düzeyindeki artış, üretimin artmasına bağlıdır. Üretimin artması da sanayileşme ile birlikte tarımdaki gelişmelerle mümkün olmaktadır. Toprak, çevre, su ve hava kirliliğinin artması tarımın gerilemesine ve bunun sonucunda da sağlıksız ve kalitesiz üretimin artmasına neden olmaktadır. Gittikçe büyüyen dünya pazarları ve bunların besin maddelerine olan isteklerinin artması üretimi dış pazarlara yöneltmektedir. Dış pazarlara olan bağımlılığı azaltma, tarımsal üretimin artırma ve geliştirme için önlemler alınmalıdır. Besin üretimi ve enerji yönetiminin birlikte yapılabildiği, iklim koşulları ile kaliteli ve sürekli üretimin gerçekleştirildiği sera işletmeciliği bu önlemlerden biridir [9].

Sera için uygun iklim koşullarının sağlanması seranın yapısına ve serada kullanılan donanımlara bağlıdır. Serada kullanılacak olan donanım seranın büyüklüğüne ve hacmine göre tasarlanır. Isıtma, soğutma, gölgeleme, sulama ve ışıklandırma seranın donanımını oluşturur. Sera yetiştiriciliğinde akla ilk olarak toprak gelir fakat topraktan kaynaklanan birçok problem de mevcuttur. Karşılaşılan bu sorunlar topraksız tarım olarak adlandırılan bir yetiştirme şeklini ortaya çıkarmıştır. Bitkilere gerekli olan su ve besin miktarının köke verilmesi ile topraksız tarım kavramı ortaya çıkmıştır. Sera yetiştiriciliği ve topraksız tarım uygulamalarında seranın ekonomik getirisi ürünün üretim ve maliyet değerlerine bağlı olmasından dolayı beklenen üretimi gerçekleştirmek ve ürünün kalitesini arttırmak için sera içinde kullanılan klima gibi donanımlar rasyonel bir şekilde işletilmelidir. Bunları gerçekleştirebilmek için de sera içlerinde enerji yönetimi, iklim yönetimi ve kök bölgesi yönetiminin hiyerarşik bir şekilde birleşerek oluşturdukları bir model kullanılır. Bir bitkinin gelişimi sadece iklimle veya sadece gübreleme ile sağlanamamaktadır. Kullanılan tüm nitelikler kontrol edilmelidir. Bitkinin beslenmesi ve iklimlendirilmesinin birlikte gerçekleştirildiği

uygun koşullar sağlandığında kaliteli bir yetiştiricilik yapılmış olur. Günümüz seralarının geniş alanlarda ve üretimi de endüstriyel bir seviyede uygulanması gereklidir. Yüksek teknolojik olanaklara sahip olarak hazırlanan seralarda tek çatı altında 10 000 m<sup>2</sup> - 100 000 m<sup>2</sup> alanında 4.5m – 6.5 m yüksekliğinde olacak şekilde oluşturulmalıdır. Seradaki çevresel koşullar, saatlere, mevsimlere bitkilerin büyümelerine bağlı olarak hem yatayda hem de dikeyde sürekli bir değişim gösterir. Aynı seranın her bölgesinde aynı iklim özellikleri görülmez. Bir sera içerisinde birden fazla iklim özellikleri oluşur. Farklı iklimler görülmesinde sera dışı etmenlerin yanında sera içi etmenler de etkilidir. Hava sıcaklığı, bağıl nem, ışık şiddeti ve toprak nemi seraların içinde etkili olan iklimsel faktörlerdir.

Sıcaklık faktörü kontrol altında tutulması gereken en önemli parametredir. Genellikle seralarda yetiştirilen bitkiler ılıman iklim bitkileridir ve ortalama sıcaklık istekleri 17 °C - 27 °C arasındadır. Alt sınır sıcaklık değeri 15 °C üst sınır sıcaklık değeri ise 35 °C'dir. Sıcaklık 15°C'nin altına indiği durumlarda seraların ısıtılması 35 °C'nin üstüne çıktığı durumlarda ise seraların soğutulması gereklidir.



**Şekil 1.** Sera ısıtma sistemleri üstten boru ile ısıtma sistemleri (a), masa altı ısıtma sistemleri (b), alt borulu ısıtma sistemleri (c), toprak ısıtma(d), lateral ısıtma (e), sıcak hava üretici (f), üstten sıcak hava dağıtıcı (g) ve alttan sıcak hava dağıtıcı (h)

Seranın iç sıcaklığı uzun vadede 30 °C - 35°C'yi bulmamalıdır. Havalandırma sisteminde

de havalandırma pencereleri ani bir şekilde kontrol edilmemelidir. Ani değişimler bitkiler üzerinde strese yol açmaktadır. Seranın ısıtılması bitkilerin yetiştirilme şekline, ürünlerin desenlerine ve iklim koşullarına göre farklı ısıtma yöntemleri uygulanarak gerçekleştirilir. Seralarda kullanılan ısıtma sistemleri Şekil 1'de gösterilmiştir.

Isıtma günümüz koşullarında teknik bir sorun değildir, ancak sorun ekonomik ısıtma yönteminin kullanılması veya kullanılmamasıdır. Enerji kullanımının artmasına bağlı olarak artan enerji fiyatları sera yetiştiriciliğinde yapısal değişimler yapmaya, otomasyon ve kontrol teknolojisinin kullanımını gerektirmiştir. Üreticiler kısa ve uzun dönem maliyetlerini kontrol etmelidir. Seranın sıcaklık dağılımları üç yönlü valf kullanılarak uniform bir şekilde olmalıdır. Seraların ısıtma donanımı genellikle seranın iç ve dış neminin eşitlendiği sonbahar ve kış ayları için önemli olmaktadır. Seralardaki artan nem değerini kontrol edebilmek için ısıtma işlemi ve kısa aralıklarla hava dolaşımı fanları ile çalıştırılmalıdır. Bu işlemler yapılarak havanın su tutma hacmi artırılıp bağıl nem miktarı düşürülür.

Ülkemizde ısıtma işlemi genel olarak soğuk ve donlardan korunmak için yapılırken gelişmiş ülkelerde verimi artırma ve nemi azaltabilmek için yapılmaktadır. Antalya'da bitki şartları göz önüne alınarak ısıtma yapıldığında verimin yaklaşık %65 - %80 oranlarında arttığı, verimdeki bu artışında ısıtma işlemi için yapılan harcamaların üçte birini karşıladığı görülmüştür. Seraların iç sıcaklığının geceleri 15°C gündüzleri de 22°C - 26°C aralığında olması önerilmektedir.

Seralarda kontrol edilmesi gereken diğer parametre de bağıl nemdir. Genel olarak seralardaki bağıl nemin %60-%90 aralığı bitkilere önemli bir etki sağlamaz. Ama bağıl nem miktarının %60'ın altında olduğu ve havalandırmanın yapıldığı alanlarda bitkilerin taze yapraklarında su stresine neden olabilir [9].

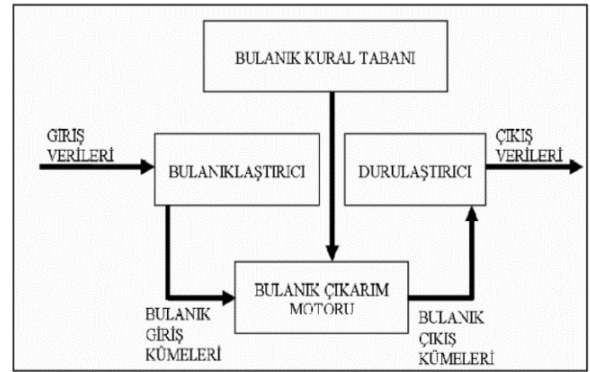
### 3. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, Elazığ ilinde kurulan bir seranın 2017 yılında ısıtma ihtiyacının olduğu aylar Ocak, Şubat, Mart, Nisan, Ekim, Kasım ve Aralık olarak belirlenmiştir. Plastik örtü kullanarak tasarlanan seranın birim taban ve

yüzey alanı için ısıtma ihtiyacı bulanık mantık, YSA ve ısı kayıp-kazanç yöntemleri kullanarak belirlenmiştir. Bir sera tüm yıl boyunca üretim yapılacak şekilde tasarlanmalıdır. İklim verileri seranın kurulduğu bölgeye en yakın meteoroloji istasyonundan sağlanabilir. Kullanılan veriler meteorolojik veriler olarak sıcaklık, bağıl nem ve ısıtma derece gün verileri, konumsal veriler olarak enlem, boylam ve rakım kullanılmıştır. 2017 yılına ait sıcaklık ve bağıl nem değerleri Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınmıştır.

### 3.1. Bulanık mantık yöntemi

Bulanık mantık, ilk olarak 1965 yılında California Berkeley Üniversitesinden Prof. L. A. Zadeh'in bulanık mantıkla ilgili yaptığı ilk makalesinin yayınlanması ile duyuldu. O tarih itibarı ile önemi giderek artan ve bugünlere gelen bulanık mantık, belirsizliklerle çalışabilmesi ve belirsizliklerin tanımlanması için kurulmuş bir sistemler bütünü olarak tanımlanabilir [10]. Bilinen matematiksel metotlarla karmaşık sistemleri modellemek ve kontrol etmek zor olduğu için bulanık mantık çok girişli karmaşık kontrol sistemlerinde tercih edilmekte ve başarılı bir biçimde uygulanmaktadır [11]. Bulanık mantık sisteminin genel yapısı Şekil 2 'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Bulanık mantık işlemleri

Şekil 2'de görüldüğü üzere sistemin etkilendiği giriş değişkenlerini ve bunlar hakkındaki bilgiler giriş verilerini içerir. Bulanıklaştırıcı, sayısal giriş değerlerini sözel olarak ifade eden üyelik derecelerine atayan işlemcidir. Bulanık kural taban birimi, giriş değişkenlerini çıkış değişkenlerine bağlayan

mantıksal eğer – ise şeklinde yazılan kuralları içerir. Kural tabanındaki giriş ve çıkış kümeleri arasında kurulan parça ilişkilerinin hepsinin toplanarak sistemin çıkışlı davranmasını sağlayan işlemleri içeren yapı bulanık çıkarım motorudur. Bulanık işlemler sonunda elde edilen sonuçların sayısal çıkış değerlerine çevrilmesi Durulaştırıcı birim tarafından çevrilir. Bilgi ve bulanık kural tabanlarının bulanık çıkarım motoru ile etkileşiminin sonucunda çıkış verileri oluşur.

Bulanık mantık; bulanık kümeler, sözel değişkenler, olasılık dağılımları ve bulanık kurallar olmak üzere dört temel kavrama dayanmaktadır.

Kesin olmayan sınırlarla oluşturulan kümeler bulanık kümeleri, nitel ve nicel bir şekilde bulanık kümelerde tanımlanan değerler sözel değişkenleri, bulanık kümelerde ifade edilen sözel değişkenlerin değer aralıkları olasılık dağılımlarını, iki değerli mantık gösterimi olarak genelleme yapan fonksiyonel haritalama veya mantıksal formül tanımlamasını yapan bilgi tasarımı gösterimi de bulanık kurallarını oluşturur [7].

Seralarda sıcaklık, hava nemi gibi değişkenler takip edilmelidir. Sera içerisinde bulunan bitkilerin gelişimi için bu unsurlar göz önüne alınmalıdır. Bu kontrol işlemi için bulanık kontrol sistemi tasarlanmıştır.

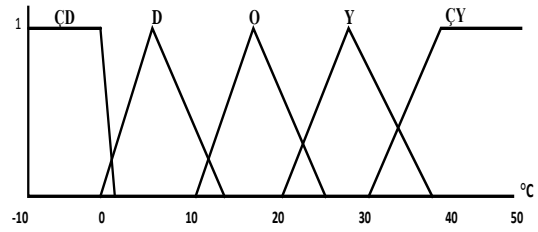
**Tablo 1.** Bulanık mantık sisteminin özellikleri

Değişkenler		Değer Aralığı	Sözel Değişkenler
Giriş	Sıcaklık	-10 °C-50 °C	Çok Düşük, Düşük, Orta, Yüksek, Çok Yüksek
	Bağıl Nem	0 %-100 %	Çok Düşük, Düşük, Orta, Yüksek, Çok Yüksek
Çıkış	Isıtma	0 W-10 W	Çok Düşük, Düşük, Orta, Yüksek, Çok Yüksek

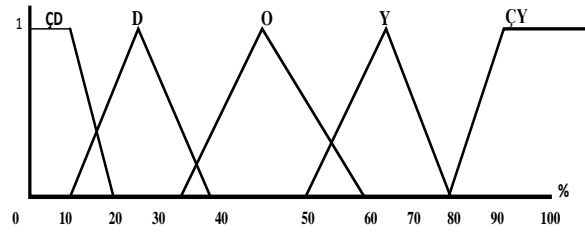
Uygulama da kullanılan bulanık mantık kontrol sistemi 2 giriş tek çıkıştan oluşmuştur. Giriş verileri, sıcaklık (°C) ve bağıl nem (%); çıkış verisi de ısıtma miktarı (W) olarak belirlenmiştir. Tasarlanan bulanık sistemin giriş, çıkış verileri ile sözel değişken özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Girişlerin çıkışları en uygun şekilde ayarlayabilmesi için algoritmanın geliştirilmesi gereken en uygun şartlar belirlenmiştir.

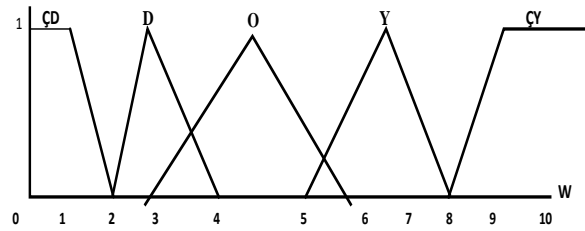
Sera da yetiştirilecek ürün olarak domates seçilmiştir. Domates bitkisi için en uygun sıcaklık 25 °C-27 °C, nem değeri de %50- %70 aralığıdır. Seranın örtü malzemesi plastiktir. Yapılan çalışmalar Elazığ ili içinde bulunan 7x25x7 büyüklüğünde plastik örtü ile kaplanan bir sera da domates yetiştiriciliğinin yapılmasında gerekli olan ısıtma miktarı için gerekli ortam şartları göz önüne alınarak tasarlanmıştır.



**Şekil 3.** Sıcaklık (°C) verisinin üyelik fonksiyonu



**Şekil 4.** Bağıl nem (%) verisinin üyelik fonksiyonu



**Şekil 5.** Isıtma (W) verisinin üyelik fonksiyonu

Üyelik fonksiyonları, lojik mantık ile bulanık mantık arasındaki en temel farktır. Üyelik fonksiyonları kullanılarak giriş ve çıkış fonksiyonlarına ait ağırlıkları 0-1 aralığında sürekli bir şekilde ifade edilir.

Sıcaklık giriş fonksiyonuna ait üyelik fonksiyonu Şekil 3’de, bağıl nem giriş fonksiyonuna ait üyelik fonksiyonu Şekil 4’de ve ısıtma çıkış fonksiyonuna ait üyelik fonksiyonunda Şekil 5’de gösterilmiştir. Bu şekillerde, ÇD: Çok

Düşük, D: Düşük, O:Orta, Y:Yüksek, ÇY: Çok Yüksek'i ifade etmektedir.

Üyelik fonksiyonları belirlendikten sonra oluşturulması gereken yapı girişlere göre çıkışın ayarlandığı bir kural tabanının oluşturulmasıdır. Tablo 2 'de verilen 25 kural yardımıyla işleyişin anlaşılabilirliği ve tasarımı kolaylaştırılmıştır.

Hazırlanan veri setlerine göre sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin durumlarına ait tüm kombinasyonlar, 5x5 kural tabanında oluşturulmuştur. Kural tabanı oluşturulurken Ödük [12] tarafından yapılan çalışma da bir uzman tarafından oluşturulan sistem temel olarak alınmıştır. Bu kurallar oluşturulurken tek ısıtıcının kullanıldığı ve bu ısıtıcıyı verdiği ısının ortam sıcaklığını 25°C -27°C aralığında ortam nemini de %50- %70 aralığında sabit tuttuğu varsayımı yapılmıştır.

**Tablo 2.** Bulanık mantık kural tablosu  
(S: Sıcaklık, BN: Bağıl Nem)

S BN	ÇD	D	O	Y	ÇY
ÇD	ÇY	ÇY	Y	Y	Y
D	Y	Y	Y	O	O
O	O	O	O	O	D
Y	D	D	D	D	D
ÇY	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD

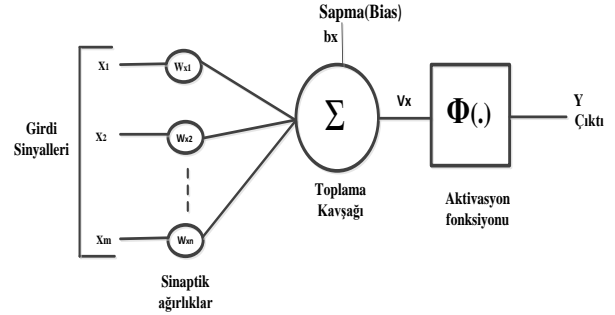
### 3.2. Yapay sinir ağları

YSA, beynin bir fonksiyonu gerçekleştirebilmesini sağlayan sistemi tasarlamak olarak tanımlanabilir. YSA'lar yapay sinir hücrelerinin çeşitli şekillerde birbirileri ile bağlanarak ve katmanlar halinde tasarlanmasından oluşur.

Beyinde ki bilgiyi işleme sürece uygun bir şekilde YSA, belirli bir öğrenme işleminden sonra bilgiyi depolayabilme gibi yeteneklere sahip bir işlemcidir [13]. Şekil 6'da genel olarak yapay bir sinir hücre yapısı gösterilmiştir.

Doğrusal olmayan yapıları modelleyebilen YSA'nın en önemli avantajları dağıtık paralel bir yapıya sahip olması, veriyi öğrenmesi ve veri üzerinde genellemeler yapabilmesi, farklı formda ki problemler üzerine uygulanabilmesi, belirli bir

hata toleransının olması, analizinin ve tasarımının kolay bir şekilde yapılabilir olmasıdır [14].



**Şekil 6.** Yapay sinir hücre yapısı

YSA hesaplamaları öğrenme ve hatırlatma olmak üzere iki adımdan oluşmaktadır.

**Öğrenme:** YSA'da öğrenme süreci insan zekâsında olduğu gibi örnekler kullanılarak sistem eğitilir. YSA'nın en önemli noktalarından biri eğitime algoritmalarıdır. YSA'nın eğitiminde ne kadar çok örnekle eğitim yapılırsa sistem o kadar doğru olur

**Hatırlama:** Ağın öğrenmesi sonucunda oluşturulan ağırlıkları kullanarak ağa belirli bir problemin giriş değerleri verilerek bu problemin çözülmesi istenir [15].

Bu çalışmada ısı ihtiyacının tahmini için ileri beslemeli YSA modeli kullanılmıştır. Modelin eğitilmesinde LM algoritması kullanılmıştır. LM algoritması, YSA eğitiminde hızlı ve kararlı olduğundan dolayı tercih edilmiştir. Isıtılması tasarlanan seranın boyutu 7x25x7 olarak belirlenmiştir.

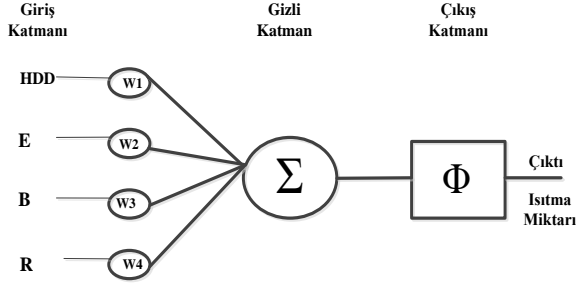
YSA modeli tasarlanırken veriler iki gruba ayrılmıştır. İlk grup modelin eğitilmesinde, ikinci grup da modelin test edilmesinde kullanılmıştır. Oluşturulan YSA modeli 100 iterasyon ile öğrenmesini tamamlamıştır. Modelin performansı 100 iterasyondan daha düşük iterasyon sayılarından azaldığı, 100'den daha fazla iterasyon sayılarından da çıktı değerini ezberlediği görülmüştür.

YSA modeli kullanarak tahmin yapabilmesi için öncelikli olarak YSA'nın eğitilmesi gerekir. Ağın eğitiminde ağırlık ve hedef değişkenleri kullanılır. Ağırlıklar ( $w_i$ ) şeklinde gösterilmiştir. Girdi değerleri ile ağırlıklar çarpılarak gizli katmandaki toplam net girdi hesaplanır.

Şekil 7'de görüldüğü gibi model nöron girdi verileri giriş katmanında 4 adet, çıktı verileri çıkış



katmanında 1 adet olacak şekilde, tek kat-mandan ve tek katmanda ki nöron sayısı da 10 olacak şekilde tasarlanmıştır. Toplam 87 veri kullanılmıştır. Bunların 75'i eğitim verisi, 12'si de test verisi olarak kullanılmıştır.



Şekil 7. Tasarlanan YSA modeli

Giriş verileri olarak illere ait HDD, enlem (E), boylam (B) ve rakım (R) kullanılmıştır. Kurulan sistem Baytorun ve diğ. [4] çalışmaların da her il için belirlenen HDD yöntemi ile oluşturulan veri kümesi ile eğitilmiştir.

$$HDD(Th) = \sum_{k=1}^n (Th - To) \quad (1)$$

Tablo 3. Şehirler ve HDD değerleri

Şehir	HDD değeri
Ardahan	4469
Erzurum	4205
Kars	4145
Ağrı	3867
Bayburt	3545
Elazığ	2211
Ankara	2199
Balıkesir	1498
İstanbul	1433
Samsun	1377
Aydın	867
İzmir	845
Hatay	797
Antalya	731
Adana	579
Mersin	552

Çalışmada kullanılan ısıtma gün derecesi kavramı uluslararası literatürde HDD şeklinde ifade edilmektedir. Çalışma da kullanılan Türkiye'nin farklı illeri için en düşük ve en yüksek HDD değerleri Tablo 3'de gösterilmiştir.

HDD değeri hesaplanırken Denklem 1 kullanılır. Denklem 1'e göre  $Th$  eşik değeri  $16^\circ C$  alınmıştır.  $To$  da ölçülen sıcaklığı göstermektedir.

### 3.3. Isı kayıp - kazanç yöntemi

Isıtma hesabında kullanılan diğer bir yöntem de geleneksel ısı kayıp-kazanç yöntemidir. Seraların ısıtma miktarlarının hesaplanmasında ısı kazancı ile kaybı arasındaki farkın eşitlenmesini temel alan ısı dengesi yaklaşımı kullanılmıştır. Seralar da örtü malzemesi kullanıldığından dolayı örtü malzemesinin tipi ısı kapasitesinin hesabında önemlidir. Kullanılan örtü malzemesinin ısı iletim kat sayısı da kaybolan ısı miktarının hesaplanmasında kullanılan en önemli etkidir. Seradan kaybolan ısı miktarı, denklem 2 temel alınarak düzenlenen ısı kaybı cetveli kullanılarak hesaplanabilir.

$$Q = A \times K \times (Ti - Td) \quad (2)$$

Denklem 2'de  $Q$  sera ısı akım gereksinimi (kcal),  $A$  seranın toplam alanı ( $m^2$ ),  $K$  kullanılan malzemenin ısı transfer kat sayısı ( $W/m^2 K$ ),  $Ti$  konfor sıcaklığı ( $^\circ C$ ) ve  $Td$  ortam sıcaklığı ( $^\circ C$ ) parametrelerini ifade etmektedir [16].

İletimsel ısı kayıplarının hesabında, denklem 2 temel alınarak hazırlanan ve bir örneği Şekil 8'de gösterilen, ısı kaybı cetveli kullanılır. Bu cetvelde bilinen değerler yazılarak hesaplamalar yapılır.

Isı kaybı hesabı cetveli aşağıdaki adımlar uygulanarak oluşturulur.

**Adım 1.** İlk sütuna yapı bileşenlerinin sembolleri; İkinci sütuna, yönü; üçüncü sütuna, kalınlıkları; dördüncü sütuna, uzunlukları ve beşinci sütuna, yükseklik (veya genişlik) yazılır.

**Adım 2.** Dört ve beşinci sütunların çarpımı yapılarak altıncı sütunun toplam alanı belirlenir.

**Adım 3.** 7. sütunda 6. Sütunda hesaplanan alanlardan kaç tane olduğu belirlenir.

**Adım 4.** 8.sütunda net duvar alanını bulmak için kullanılan pencere ve kapı alanları yazılır.

**Adım 5.** 9. sütuna, hesaba giren alan yazılır.

**Adım 6.**Yapı bileşenlerinin hesabında hesaplanan  $K$  toplam ısı geçiş katsayısı 10.sütuna yazılır.

**Adım 7.** Dış ortam ve iç ortam arasındaki sıcaklık farkı 11.sütuna yazılır.

**Adım 8.** 9, 10 ve 11. sütunlarının çarpımından oluşan ısı kaybı 12. sütuna yazılır.

**Adım 9.** Birleştirilmiş artırım katsayısı ( $Z_d$ ) 13.sütuna yazılır.

**Adım 10.** Kat yükseklik artırımı ( $Z_r$ ) 14. sütuna yazılır. Sera olduğu için hesaba katılmamıştır.

**Adım 11.** Yön artırımı ( $Z_h$ ) 15.sütuna yazılır. Bu değer seranın yönünden dolayı dikkate alınması gereklidir.

**Adım 12.** Artırımların toplamı 16. Sütuna yazılır. Toplam artırım miktarı ( $Z$ ), Denklem 3 kullanılarak hesaplanır.

$$Z = (1 + \% Z_d + \% Z_r + \% Z_h) \quad (3)$$

**Adım 13.** 17. sütuna toplam ısı gereksinimi ( $Q_h$ ) yazılır.

**Adım 14.** İşlem sonlandırılır [6].

Şekil 8’de verilen ısı kaybı cetvelinde seranın toplam ısı ihtiyacı, zamansız ısı kaybı ve toplam artırım miktarı kullanarak ortaya çıkan ısı enerjisi

ile alan ve toplam ısı geçiş katsayıları sonucu elde edilen ısı enerjisinin toplamı ile bulunur. Seranın konfor sıcaklığı 25 °C, ölçülen sıcaklık 11 °C, toprak sıcaklığı ortam sıcaklığından 6 °C daha fazla olduğu için 20 °C, seranın boyutları 7x25x7, sera dış kapısı demir kapının boyutları 1x2,1 yönü kuzey ve sera örtüsü plastik (pvc) olarak alındığında zamansız ısı kaybı; kapı, duvarlar ve tavan için hesaplanıp 2808 KCal/h,  $Z_d$  değeri %7,  $Z_r$  değeri sera tek katlı olduğu için işleme alınmayıp, seranın yönü kuzey olduğu için  $Z_h$  değeri % 5, toplam artırım miktarı % 1,12 olarak hesaplandığında zamansız ısı kaybı ve toplam artırım miktarı kullanılarak 3145 KCal/h ısı enerjisi, alan ve toplam ısı geçiş katsayılarından da 2229 KCal/h enerji edilir. Toplam ısı enerjisi 5374 Kcal/h bulunur. Buna göre Şekil 8’deki tablo kullanılarak seraya verilmesi gereken ısı miktarı da 6,25 W olarak hesaplanır.

														SAYFA		1
														KAT		ZEMİN
														TARİH		8.03.2018
<i>ISI KAYBI HESABI</i>																
ÖZLEM ALPAY																
YAPI BİLEŞENİ			ALAN HESABI					ISI KAYBI HESABI				ZAMLAR				TOPLAM
İŞARET	YÖN	KALINLIK	UZUNLUK	YÜK VEYA GENİŞLİK	TOPLAM ALAN	MİKTAR	ÇIKARILAN ALAN	HESABA GİREN ALAN	TOP. ISI GEÇİŞ KATSAYISI	SICAKLIK FARKI	ZAMSIZ ISI KAYBI	İŞLETME	KAT YÜKSEKLİK	YÖN	TOPLAM	
		m	m	m	m <sup>2</sup>	Ad	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	Kcal	°C	KCal/h	Z <sub>d</sub>	Z <sub>r</sub>	Z <sub>h</sub>	Z	
SERA 25 °C																
B.K	K		1,00	2,10	2,1	1		2,10	2,6	14	76					
PVC	K	0,2	7,00	5,00	35	1	2,1	32,90	0,249	14	115					
PVC	D	0,2	25,00	5,00	125	1		125,00	0,249	14	436					
PVC	G	0,2	7,00	5,00	35	1		35,00	0,249	14	122					
PVC	B	0,2	25,00	5,00	125	1		125,00	0,249	14	436					
TAV	D	0,2			43,98	1		43,98	0,249	14	153					
T.DÖ		0,2			147	1		147,00	0,5	20	1470					
											2808	7		5	1,12	3145
	Q <sub>k</sub>	=	15,00	x	5,46	x	0,90	x	0,84	x	36	x	1,00			2229
																5374

Şekil 8. Isı kaybı hesabı cetveli

#### 4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, Elazığ iline ait bir serada ısıtma ihtiyacının olduğu aylar için ısıtma ihtiyacının tahmini geleneksel yöntem, bulanık mantık ve YSA kullanılarak yapılmıştır. 2017 yılında toplam 5065 ölçüm yapılmıştır. Bu değerler kendi aralarında gündüz değerleri, gece değerleri ve ortalama değer olmak üzere 3 sınıfa ayrılmıştır. Bu değerler kullanılarak yöntemler test edilmiştir.

Bulanık mantık yönteminde sıcaklık, bağıl nem ve ısıtma değerleri Tablo 1’de ki gibi kullanılmıştır. Oluşturulan kurallar Tablo 2’de verilmiştir. Sıcaklık ve nem değerleri giriş verileri olarak kullanılıp ısıtma ihtiyacı çıkış verisi olacak şekilde ısı gereksiniminin tahmini yapılmıştır.

Isı kayıp-kazanç yönteminde de sera iç sıcaklığı, konfor sıcaklığı ve seranın özellikleri kullanılarak Şekil 8’de gösterilen ısı kaybı hesabı cetveli kullanılarak ısıtma ihtiyacı tahmini yapılmıştır.

YSA yönteminde de toplam 87 verinin 75 verisi eğitim 12 verisi de test için kullanılmıştır. Eğitim veri seti olarak kullanılan şehirler ve HDD değerleri Tablo 3’de gösterildiği gibi kullanılmıştır.

Bu veriler LM eğitim algoritması kullanılarak değerlendirilmiştir. Test verileri farklı ağ yapılarında test edilip en iyi tahmin sonucu olan ağ yapısı kullanılmıştır.

Elazığ ili için 2017 yılında ölçülen 5065 veriden alınan ortalama sıcaklık ve bağıl nem değerleri Tablo 4’de gösterilmiştir.

**Tablo 4.** Kullanılan ortalama sıcaklık (OS, °C) ve bağıl nem (BN, %) değerleri

	Gece	Gündüz	Ortalama
	OS /BN	OS /BN	OS /BN
Ocak	-5.5 / 84.6	3.9 / 76	-0.8 / 80.3
Şubat	-7.5 / 59.3	7.03 / 54.8	-0.2 / 57
Mart	0.4 / 77.7	13.5 / 61,6	6.9 / 69.7
Nisan	2.8 / 80.3	18.4 / 65.4	10.6 / 72.8
Ekim	6.9 / 59.7	22.7 / 49.9	14.8 / 54.8
Kasım	1.3 / 73.6	13.3 / 65.9	7.3 / 69.7
Aralık	-1.3 / 84.1	7 / 83.1	2.8 / 83.6

Isıtılması planlanan seranın tipi ve özellikleri Tablo 5’de ve görünümü ise Şekil 9’ da gösterilmiştir.

**Tablo 5.** Kullanılan seranın tipi ve özellikleri

Sera Tipi	Genişlik	Uzunluk	Yükseklik	Örtü Malzemesi
 Beşik Çatılı Sera	7 m	25m	7m	Plastik

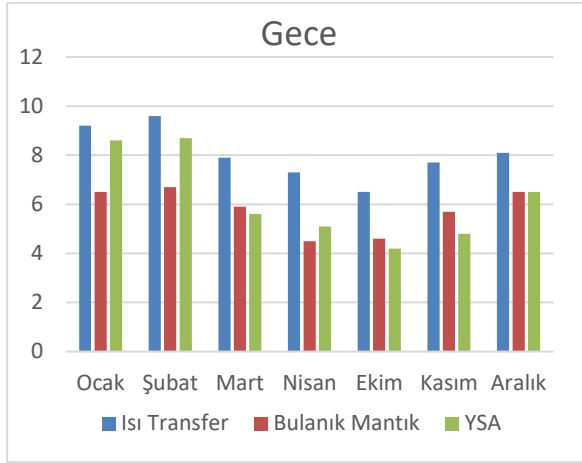


**Şekil 9.** Seranın görünümü

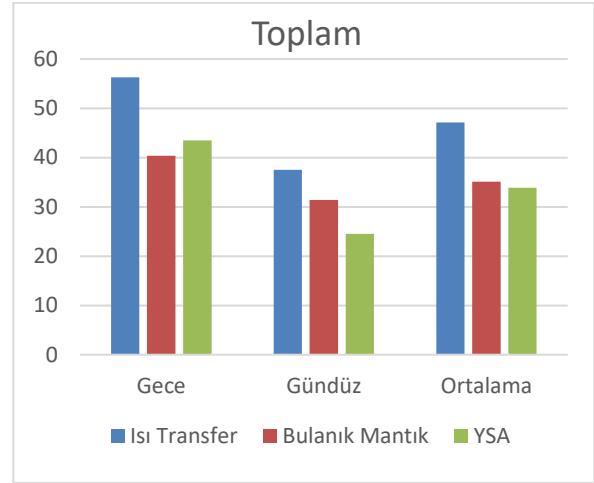
#### 5. Sonuçlar

Seralarda ısı ihtiyacının tahmini edilebilir olması işletme planları ve fizibilite çalışmaları için gerekli olmaktadır. Seranın ısı ihtiyacı seranın türüne, boyutlarına kullanılan malzemenin tipine ve sera da istenen sıcaklık değerleri ile sera dışı faktörlere (sıcaklık, nem vb.) bağlı olarak değişmektedir. Seraların ısı ihtiyaçlarının belirlenmesinde genellikle ortalama sıcaklık değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

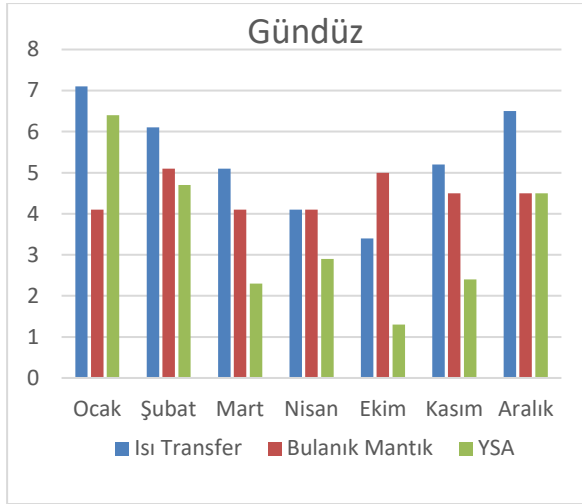
Bu çalışmada, yumuşak hesaplama yöntemlerinden olan bulanık mantık yöntemi, YSA ve geleneksel yöntem olarak kabul edilen ısı kayıp- kazanç yöntemleri kullanılarak Elazığ iline ait bir sera için birim alanda gerekli olan ısıtma gereksinimleri analiz edilmiştir. Yapılan çalışmada Elazığ iline ait bir serada ihtiyaç duyulan ısıtma miktarı sıcaklık, bağıl nem, enlem, boylam, yükseklik ve ortalama sıcaklık verileri kullanılarak seraların ısıtma ihtiyacı tahmini yapılmıştır. Çalışma 3 aşamadan oluşmaktadır. Gündüz alınan değerler, gece alınan değerler ve ortalama değerler alınarak ısıtma ihtiyaç tahmini yapılmıştır.



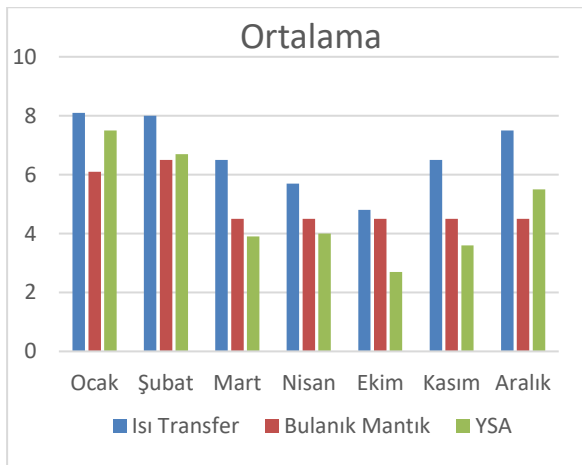
Şekil 10. Gece alınan değerlere göre harcanan ısı miktarları



Şekil 13. Toplam harcanan ısı miktarları



Şekil 11. Gündüz alınan değerlere göre harcanan ısı miktarları



Şekil 12. Ortalama değerlere göre harcanan ısı miktarları

Gece alınan değerlere göre hesaplanan ısı miktarları Şekil 10'da, gündüz alınan değerlere göre hesaplanan ısı miktarları Şekil 11'de, ortalama değerlere göre hesaplanan ısı miktarları Şekil 12'de, toplam değerlere göre hesaplanan ısı miktarları Şekil 13'de gösterilmiştir.

Şekil 10,11,12,13'de görüldüğü üzere ısı kayıp-kazanç yöntemi seraların ısıtılmasında en çok ısı enerjisi harcanan yöntemdir. YSA ve bulanık mantık yöntemleri seranın ısıtılması için gerekli ısı miktarını daha az bularak üreticiye enerji harcama miktarı konusunda katkı sağlamaktadır.

Şekil 10'da yöntemler karşılaştırıldığında bulanık mantık yönteminin ısı kayıp-kazanç yöntemine göre yaklaşık %23, YSA modeli de ısı kayıp-kazanç yöntemine göre yaklaşık %18 daha az ısı enerjisi ile Şekil 11'de yöntemler karşılaştırıldığında bulanık mantık yönteminin ısı kayıp-kazanç yöntemine göre yaklaşık %9, YSA modeli de ısı kayıp-kazanca göre yaklaşık %19 daha az ısı enerjisi ile Şekil 12'de yöntemler karşılaştırıldığında bulanık mantık yönteminin ısı kayıp-kazanç yöntemine göre yaklaşık %14, YSA modeli de ısı kayıp-kazanca göre yaklaşık %18 daha az ısı enerjisi ile Şekil 13'de toplam gece, gündüz ve ortalama miktarlara göre yöntemler karşılaştırılmıştır. Isıtma ihtiyacının yapıldığı aylarda ısıtma için harcanan toplanan ısı miktarları arasında bulanık mantık yöntemi ısı kayıp-kazanç yöntemine göre yaklaşık %16, YSA modeli de ısı kayıp-kazanca göre yaklaşık %19 daha az ısı enerjisi ile çalışmaktadır. Cossu ve diğ. [8] tarafından yapılan çalışma da yıllık bazda %64'lük bir enerji kazancı sağlanırken,

geliştirilen yöntemlerde de aylık bazda yaklaşık %20'lik bir enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Bu çalışmadan daha sonra yapılacak çalışmalarda sistemler gerçek zamanlı olacak şekilde gerçekleştirmeye yönelik olacaktır. Sisteme sıcaklık, bağıl nem, toprak nemi ve ışık miktarını ölçen sensörlerin eklenmesi ile oluşturulacak akıllı sera sisteminde seranın ısıtılması, soğutulması, sulanması, ışıklandırılması gibi işlemler uzaktan ve uygun miktar ve şartlarda gerçekleştirileceği için önemli miktarda enerji zaman ve tasarrufu sağlanabilir. Mikro kontrolör veya gömülü sistemler kullanarak alınan veriler bilgisayar veya internet ortamında kaydedilip, grafiksel olarak görüntülenmesi kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır. Bununla birlikte büyük ölçekli seralar içinde RF vericileri olan mikro kontrolörler veya kablosuz sensör ağları kullanarak kablosuz haberleşme sistemleri kullanarak sisteme esnek bir şekilde tasarlanabilir.

## 6. Kaynaklar

1. Yelmen, B., Çakır, M.T., (2011). Yapay sinir ağları kullanılarak sera ısıtma ihtiyacının tahmini, *Politeknik Dergisi*, **14**(4): 235-241.
2. Kendirli, B., (2015). Sera ısıtma gereksiniminin tahmininde farklı yaklaşımların incelenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, **10**(2):125-134.
3. Gürdil, G.A.K., Selvi, K.Ç., Önder, H., (2009). Seralarda ısıtma kapasitelerinin hesaplanmasına yönelik bir bilgisayar programı, 25. Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi.
4. Baytorun, A.N., Üstün, S., Akyüz, A., (2016). Farklı ısıtma-derece-gün (HDD) değerlerine bağlı olarak seralarda ısı enerjisi gereksiniminin belirlenmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **31**(2):119-128.
5. Zhou, N., Yu, Y., Yi, J., Liu, R.A., (2017). Study on thermal calculation method for a plastic greenhouse with solar energy storage and heating, *Solar Energy*, **142**:39-48.
6. Cemek, B., (2005). Samsun il ve ilçelerinde seraların iklimsel ihtiyaçlarının belirlenmesi, *O.M.Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, **20**(3):34-43.
7. Ayan, M., Şenol, R., (2016). Bulanık mantık tabanlı-uzaktan erişimli sera otomasyonu, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **4**:734-746.
8. Cossu, M., Murgia, L., Ledda, L., Deligios, P.A., Sirigu, A., Chessa, F., et al. (2014). Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity *Appl Energy*, **133**:89-100.
9. Yılmaz, C., (2013). Seralar için fonksiyonlu akıllı kontrol sistemleri, VI. Kontrol Otomasyon ve Yapı Elektronik Sistemleri Sempozyumu Bildirileri, İzmir.
10. Li, H.X., Gatland, H.B., (1996). Conventional fuzzy control and its enhancement, *IEEE Transactions On Systems Man And Cybernetics Part B, Cybernetics*, **26**(5):791-796.
11. Liu, K., Lewis, F.L., (1993). Some issues about fuzzy logic control, *Proc. of the 32nd Conference on Decision and Control*, **2**:1743-1748.
12. Ödük, M.N., (2010). Bulanık kontrol yöntemiyle sera otomasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
13. Ataseven, B., (2013). Yapay sinir ağları ile öngörü modellenmesi, *Marmara Üniversitesi Öneri Dergisi*, **10**(39):101-115.
14. Bahadır, Y., (2013). Cam elyaf katkılı cephe kaplama elemanlarına yönelik teklif fiyatı tahmininde yapay sinir ağlarının (YSA) kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
15. Özdemir, H., (2013). Yapay sinir ağları ve dokuma teknolojisinde kullanımı, *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi* **7**(1):51-68.
16. Isı Kaybı Hesabı Örneği [http://deneysan.com/content/images/documents/isitma2\\_6562174.pdf](http://deneysan.com/content/images/documents/isitma2_6562174.pdf)



## Ti-6Al-4V Alaşımının Fiber Lazer ile Kesilmesinde İşlem Parametrelerinin Kesim Kalitesine Etkisinin Araştırılması

Mustafa AY<sup>1</sup>, Fatih YÜCELİŞLİ

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
\*mustafaay@firat.edu.tr

(Geliş/Received:26.03.2018; Kabul/Accepted: 10.07.2018)

### Özet

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımının Fiber Lazer ile kesme işleminde akım şiddeti, kesme hızı ve yardımcı gaz basıncı gibi işlem parametrelerinin kesme ve ürün kalitesine etkileri araştırılmıştır. Parametreler ve faktör seviyelerine göre, kesme işlemleri sonrasında, numunelerin kerf genişlikleri, kerf eğim açıları, yeniden katılacak tabaka kalınlığı (YKTK) ve yüzeylerinde meydana gelen metalurjik değişimler; X – ışınları difraksiyonu (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemleri kullanılarak ölçülmüş ve kesme parametrelerinin işlem kalitesi üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Sonuç olarak, gücün artması ile yeniden katılacak tabaka kalınlığı ve kerf genişliği artmış, kesme hızının artması ile kerf genişliği ve yeniden katılacak tabaka kalınlığı azalmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Fiber Lazer Kesim, Ti6Al4V, Yüzey morfolojisi

### Investigation of the Effect on Cutting Quality of Process Parameters in Fiber Laser Cutting of Ti-6Al-4V Alloy

#### Abstract

In this study, the effect of cutting parameters such as current intensity, cutting speed and gas pressure on cutting and product quality of Ti-6Al-4V alloy in fiber laser cutting process were investigated. According to the parameters and factor levels, after the cutting operations, the kerf widths, taper angles, the recast layer thickness and metallurgical changes occurring in the cutting surfaces of the samples were measured using X - ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) methods and the effects of cutting parameters on the process quality were determined. As a result, increased recast layer thickness and kerf width, increased cutting speed, and decreased kerf width and recast layer thickness increased with increasing power.

**Keywords:** Fiber Laser cutting, Ti6Al4V, Surface morphology

#### 1. Giriş

Titanyum (Ti) alaşımları, düşük yoğunluk-yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci ve yüksek sıcaklıklarda sertlik, yorulma direnci gibi üstün performans özelliklerinden dolayı tıbbi, havacılık, otomotiv, petrokimya, nükleer ve elektrik üretim endüstrisi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Bu alanlardaki zorlu çalışma koşulları Ti ve alaşımları tarafından etkili bir şekilde karşılanmakta, ancak artan ham madde ve işleme maliyetleri özellikle otomotiv ve uçak

Lazer kesim işlemi, geleneksel kesme yöntemlerine göre çeşitli avantajlar sunar. Dar çentik genişliği (minimum malzeme kaybı), düz kesim kenarları, kesme yüzeylerinin düşük pürüzlülüğü, minimum metalurjik ve yüzey

endüstrisinde kullanılmalarını oldukça seçici hale getirmektedir. Diğer taraftan Ti ve alaşımlarının düşük ısı iletkenliği, düşük elastik modülü ve yüksek sıcaklıklarda takım ömrünü olumsuz etkileyen yüksek kimyasal afinitelerinden dolayı geleneksel imalat yöntemleri ile işlenmesi zaman ve maliyet açısından problem yaratmaktadır [4]. Ti alaşımlarının geleneksel endüstriyel uygulamalarda daha geniş çapta kullanılmasını sağlamak ve imalatıyla ilgili zorlukları, maliyetleri azaltmak için geleneksel imalat yöntemlerinden ziyade ileri imalat süreçlerinin kullanılması kaçınılmaz olmuştur.

bozulmaları, karmaşık profillerin kesilmesi ve sürecin temassız gerçekleşmesinden dolayı lazer kesim Ti alaşımlarının işlenmesinde umut verici bir süreçtir [5]. Literatürdeki bazı çalışmalarda, Ti ve alaşımlarının kesiminde, Nd: YAG lazer ve

sürekli dalga modunda (CW) çalışan CO<sub>2</sub> lazeri kullanılmıştır. Rao ve diğ. [6] 1 mm kalınlığında Titanyum plakanın darbeli CO<sub>2</sub> lazer kesimi için N<sub>2</sub>, Ar ve He yardımcı gazları kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda, yüksek frekanslı ve düşük çalışma döngüsü darbe modu ile fark edilmeyen bir HAZ ve curufsuz kesimler elde edildiği. Helyum, yüksek ısı konveksiyonu ve yüksek kesme gerilmesi üretme yeteneği nedeniyle, kesme gazı olarak argon ile üretilenlere kıyasla dar HAZ ve düşük çapaklı kesimleri oluşturduğu rapor edilmiştir. Shanjin ve Yang [7] çalışmalarında, Ti alaşımları, oksijen yardımcı gazı ile kesildiğinde, düşük basınçta bile, geniş kesme kanalı ve düşük yüzey kalitesi ile sonuçlandığını. Titanyumun oksijen ve nitrojen ile reaksiyonu, sert ve kırılğan ince bir oksit ve nitrit tabakası oluşturduğu, ayrıca nitrojen veya argon yardımcı gaz ile kıyaslandığında çok daha kalın ısıdan etkilenen bölgenin olduğu belirtilmiştir. Andersson ve Granberg [8], Ti6Al4V plakayı CO<sub>2</sub> lazer ile kesiminde işlem parametrelerinin kesme kalitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Malzeme kalınlığının artması ile ısıdan etkilenen bölgenin, yüzey düzensizliği ve çapak yüksekliğinin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, Azot ile kesilen numunelerin Argon ile kesilen numunelere kıyasla daha fazla yüzey pürüzlülüğüne sahip olduklarını belirtmişlerdir. Fiber ve CO<sub>2</sub> lazerlerinin teknik ve ticari açıdan karşılaştırılmasıyla, fiber lazerler, yüksek derecede yansıtıcı malzemeleri ve ince kesit metalleri keserken (yaklaşık 4 mm'nin altında) CO<sub>2</sub> lazerlere nazaran daha iyi olduğunu göstermektedir [9]. Ayrıca, Fiber lazerlerin

kullanımı, işlem süresinin büyük ölçüde azalmasından dolayı üretim maliyetlerini düşürme stratejisinin uygulanmasına izin vermektedir [10].

Bu çalışmada, Ti6Al4V Titanyum alaşımının Fiber Lazer ile kesilmesinde lazer gücü, kesme hızı ve yardımcı gaz basıncı gibi parametrelerin kesme kalitesi üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada, kerf genişliği, kerf eğim açısı ve yeniden katılğan tabak kalınlıkları ölçülmüştür.

## 2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiş olan endüstride Gr5 olarak isimlendirilen 2mm kalınlığında Ti6Al4V titanyum alaşımı plaka kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi (%)

Ti	Al	V	Fe	C	N	O
89,7	6,01	3,89	0,2	0,01	0,018	0,15

Fiber lazer ile kesme deneyleri Bursa Ermaksan A.Ş. firmasında Fibermak G Force Fiber Lazer kesim tezgahı ile yapılmıştır. Deneylerde, lens çapı 150 mm, nozul çapı 2 mm, yardımcı gaz tipi Argon (Ar), puls frekansı 200 Hz ve odak pozisyonu -1,2 (Yüzey altı) sabit tutulmuş. Güç 3000 – 3500 – 4000 wat, yardımcı gaz basıncı 12 – 15 – 18 bar, kesme hızı 13600 – 16000 – 18400 mm/dak değerleriyle kesme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 2' de, verilen parametreler ve seviyeleri kullanılarak toplam 27 deney yapılmıştır.

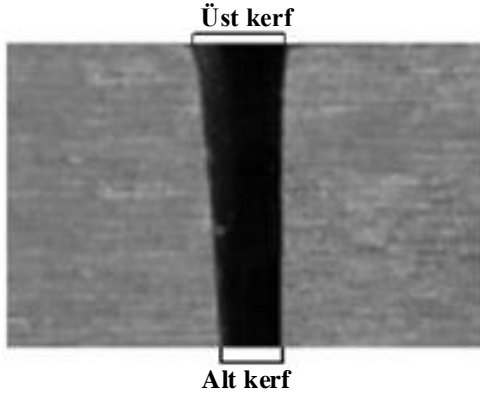
**Tablo 2.** Lazer kesme deneylerinde kullanılan işleme parametreleri ve seviyeleri

Kesme Parametreleri	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
Lazer Gücü (W)	3000	3500	4000
Puls Frekansı (Hz)		200	
Kesme Hızı (mm/dak)	13600	16000	18400
Yardımcı Gaz		Ar	
Gaz Basıncı (Bar)	12	15	18
Nozul Çapı (mm)		2	
Lens Çapı (mm)		150	
Odak Pozisyonu (mm)		-1,2 (Yüzey altı)	

Her bir parametre ile yapılan kesme deneyleri sonunda, Şekil 1' de şematik olarak gösterildiği gibi alt ve üst kerf genişlikleri kerf boyunca beş ayrı noktadan 0.002 hassasiyete sahip (Model 98-

0001, SCHERR TUMICO, U.S.A) ölçüm mikroskopuyla ölçüldü. Bu ölçümlerin ortalama değerleri alınarak numunelerin kerf genişlik değeri belirlendi.





Şekil 1. Lazer kesim sonucu elde edilen tipik kerf geometrisi

Mikroskopta ölçülen alt ve üst kerf genişlikleri değerine bağlı olarak aşağıdaki formül yardımıyla kerf eğim açısı ( $K_{e.a}$ ) hesaplanmıştır.

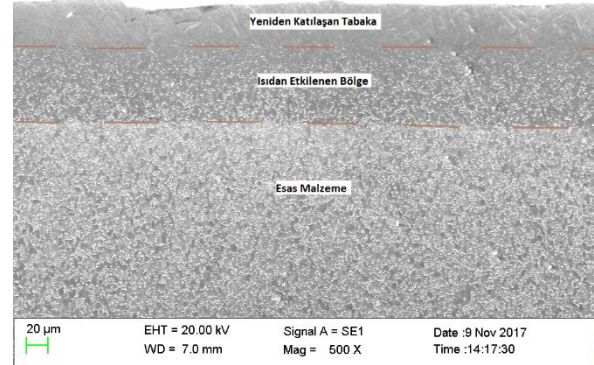
$$K_{e.a} = \frac{(K_{\bar{u}} - K_a) \cdot 180}{2 \cdot \pi \cdot t} \quad (1)$$

Burada,  $K_{\bar{u}}$ , üst kerf genişliği  $K_a$ , alt kerf genişliği  $t$  ise iş parçası kalınlığını ifade etmektedir. Kesme deneyleri sonucunda, numunelerin yüzey görüntüleri, yüzeylere ait mikro yapıları ve ısıdan etkilenen bölgeleri belirlemek için, işlenen yüzeye dik komşu bir yüzey seçildi. Numuneler bakalite alındıktan sonra bu yüzeyler sırasıyla, 400, 800 ve 1200 mesh' lik zımparalar ile zımparalanmış ve daha sonra  $3\mu\text{m}$  ve  $1\mu\text{m}$ ' lik elmas pasta kullanılarak çuhayla parlatılmış ve sonra alkolle yıkanarak kurutulmuştur. Dağlama işleminde, Ti-6Al-4V için keller çözeltisi (%0,5 HF - %1,5HCl - %2,5HNO<sub>3</sub> - %95,5 H<sub>2</sub>O) kullanılmıştır. Dağlama işleminde sonra, numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Numunelere ait SEM görüntüleri alınırken numunelerin kesilmiş yüzeylerinde oluşan elementer içerikleri ve fazları tespit etmek için EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. Numunelerin mikrosertlik ölçümleri, yeniden katılan tabaka, ısıdan etkilenen bölge ve ana malzeme olmak üzere üç ayrı bölgeden altışar adet olmak üzere toplam 18 farklı noktadan sertlik ölçümleri alınarak bu üç bölgenin mikrosertlik değerleri belirlenmiştir.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Deney sonrası numunelerin mikroyapı incelemesi

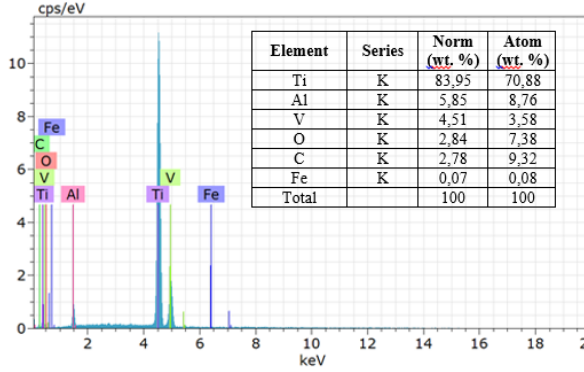
Lazer ışını ile kesme esnasında oluşan temel metalürjik etkiler, yeniden katılan tabaka ve ısıdan etkilenen bölgenin şekil ve boyutlarındaki değişimlerdir. Şekil 2'de fiber lazer ile kesilmiş bir yüzeyden alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde, üç farklı bölge görülmektedir. En üstte bulunan yeniden katılan tabakadır. Bu tabaka, lazer ışını ile kesme esnasında eriyik metalin yardımcı gaz basıncı ile kesme kanalından uzaklaştırılmadan yüzeyde hızlı bir şekilde soğuyup yeniden katılması sonucunda oluşmaktadır. Isıdan etkilenen bölge ise, kesme esnasında ergimenin olmadığı fakat meydana gelen ısının tesiriyle esas metalin mikroyapı değişikliğine uğradığı bölgedir. En altta ise esas malzeme bulunmaktadır.



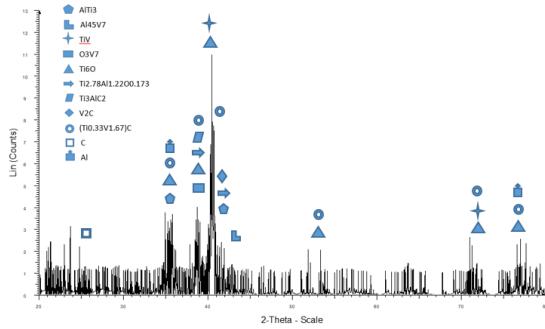
Şekil 2. Lazer ışını ile kesme sonrası malzemede meydana gelen yüzeyel bölgeler

Numunenin yeniden katılan tabaka bölgesinden alınan EDS sonuçları Şekil 3' de verilmiştir. Analiz sonucu değerlendirildiğinde oksitlenmeden kaynaklanan O miktarı % 2,84 olarak ortaya çıkmıştır. C miktarı ise % 0,01' den % 2,78' e yükselmiştir. Bu durum Şekil 4' de verilen XRD sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde lazer ışınıyla kesme işlemi sonrasında bu bölgede oluşan aşırı ısınma ve soğumanın etkisi ile yapıda bulunan ikincil fazların ve karbürlerin kısmen ana matrise geri çözüldüğü düşünülmektedir. Bununla birlikte çoğu numunenin içerisinde ise Oksijen elementi

görülmüştür. Bu fazın yapı içerisinde bulunmasının sebebi titanyum metalinin yüksek sıcaklıklarda oksijene karşı afinitesinin yüksek olmasıdır. Sıcaklık değerinin fazla olması oksit fazlarının görülmesinin en büyük sebebidir.



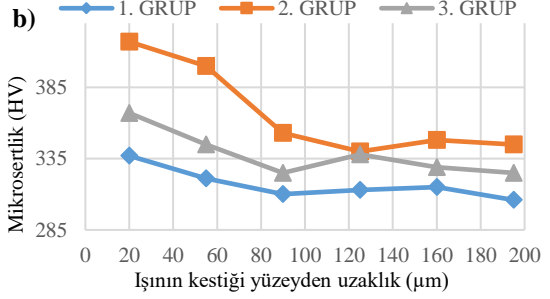
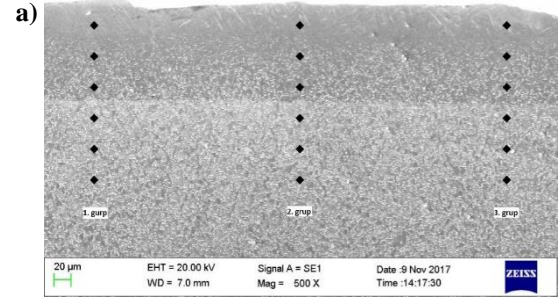
Şekil 3. Lazer ışını ile kesilmiş yüzeyden alınan EDS analizi



Şekil 4. Lazer ışını ile kesilmiş yüzeyden alınan XRD analizi

Lazer ışını ile kesme neticesinde, yüksek ısının etkisiyle kesme bölgesinde oluşan en önemli değişikliklerden birisi de malzemedeki mikrosertlik değişimidir. Kesme işleminden sonra, Şekil 5 a' da gösterildiği gibi kesilen yüzeye dik komşu bir yüzey üzerinde üç ayrı bölgeden altışar adet olmak üzere toplam 18 noktadan alınan mikro sertlik dağılımları Şekil 5 b' de verilmiştir. Şekil 5b'de görüldüğü gibi, ısıdan etkilenen bölgenin sertliği ana malzemeyle benzerlik gösterirken, yeniden katılacak tabakanın sertliği ana malzemeye göre daha yüksektir. Malzemedeki yeniden katılacak tabakanın sertlik artışı da malzemenin kesme bölgesinde aşırı ergime ve hızlı soğuma neticesinde mikroyapıda aşırı doymuş  $\alpha$  ve  $\beta$  fazları çözünerek yapıya homojen bir şekilde dağılmakta ve sertlik artışında kısmen rol almaktadır. Bununla birlikte yeniden katılacak

tabakada sertliğin artması, XRD analizinde de görüldüğü gibi oksit tabakasının oluşması ve karbon gibi çözünmüş atmosferik elementlerin artması ile düzensiz bir mikroyapı ortaya çıkmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5. a) Mikrosertlik alınan noktalar  
b) Mikrosertlik ölçüm sonuçları

### 3.2 Yeniden Katılacak Tabaka Kalınlığı (YKTK) Ölçüm Sonuçları

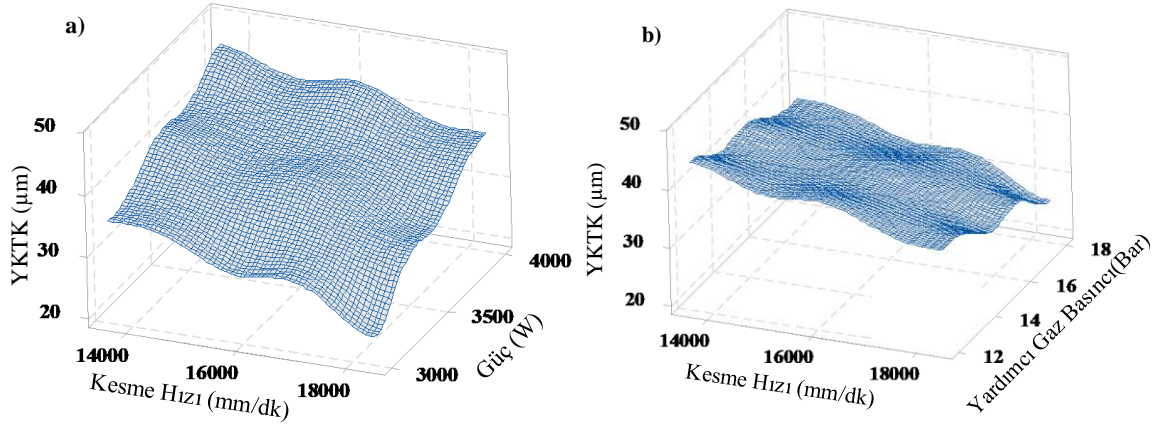
Tablo 3'de kesme parametrelerine bağlı olarak değişen ortalama yeniden katılacak tabaka kalınlığı, kerf genişliği ve kerf eğim açısı değerleri toplu olarak verilmiştir. Tablo 3'deki numunelere ait yeniden katılacak tabaka kalınlığı değerleri ve bu değerlere ait grafik (Şekil 6) incelendiğinde, lazer gücü, kesme hızı ve gaz basıncı parametreleri, kesme esnasında iş parçasına giren ısı miktarını belirleyen temel parametreler olduğu açıkça görülmektedir. Düşük güç ve yüksek ilerleme hızlarında, iş parçasına giren ısı miktarı düşük olacağından dolayı yeniden katılacak tabakanın kalınlığı da düşük olmaktadır. Bir başka değişle, sabit güç yoğunluğunda ilerleme hızının artmasıyla, ısı iletim süresi düşer ve dolayısıyla ısının meydana getirdiği hasarların genişlemesi daha az olur. Ek olarak, lazer-iş parçası etkileşim bölgesinden ergimiş metalin atılmasına yardımcı olan gaz basıncının artmasıyla, metal yüzeyinde soğutma etkisi sağlanır, bu da yeniden katılacak tabakanın

kalınlığının azalmasına yardımcı olur [11,12]. Şekil 7’de deney parametrelerinin yeniden katılaştıran tabaka kalınlığı üzerindeki etkilerini gösteren SEM görüntüleri görülmektedir.

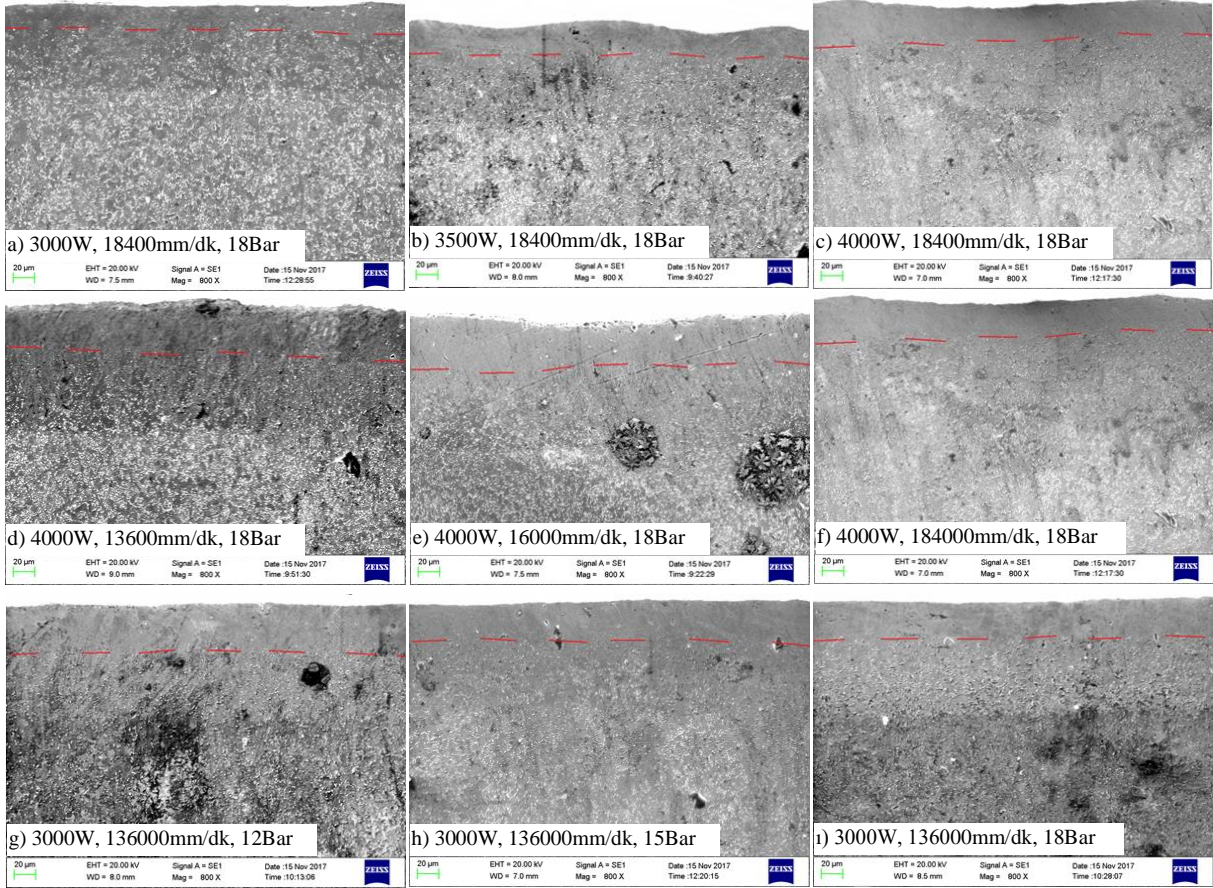
Şekillerden de görüldüğü gibi, lazer gücünün artmasıyla yeniden katılaştıran tabaka kalınlığı artmakta, kesme hızının ve gaz basıncının artmasıyla yeniden katılaştıran tabaka kalınlığı düşmektedir.

**Tablo 3.** Lazer ışını ile kesme sonrasında elde edilen ölçüm sonuçları

Deney No	Güç (Watt)	Kesme Hızı (mm/dakika)	Yardımcı Gaz Basıncı (Bar)	YKTK ( $\mu\text{m}$ )	Ortalama Üst Kerf Genişliği (mm)	Ortalama Alt Kerf Genişliği (mm)	Ortalama Kerf Eğim Açısı ( $^{\circ}$ )
1	3000	13600	12	40,7	0,312	0,268	0,63
2	3000	13600	15	35,47	0,315	0,28	0,501
3	3000	13600	18	29,24	0,318	0,288	0,43
4	3000	16000	12	34,62	0,3	0,252	0,688
5	3000	16000	15	30,5	0,303	0,261	0,602
6	3000	16000	18	23,46	0,307	0,269	0,544
7	3000	18400	12	27,6	0,279	0,226	0,759
8	3000	18400	15	21,68	0,284	0,233	0,731
9	3000	18400	18	20,15	0,287	0,24	0,673
10	3500	13600	12	44,32	0,341	0,307	0,487
11	3500	13600	15	41,3	0,345	0,312	0,473
12	3500	13600	18	38,21	0,348	0,321	0,387
13	3500	16000	12	42,12	0,321	0,28	0,587
14	3500	16000	15	37,84	0,325	0,289	0,516
15	3500	16000	18	33,23	0,327	0,295	0,458
16	3500	18400	12	36,4	0,291	0,241	0,716
17	3500	18400	15	31,26	0,294	0,254	0,573
18	3500	18400	18	25,36	0,297	0,26	0,53
19	4000	13600	12	47,38	0,365	0,336	0,415
20	4000	13600	15	46,41	0,372	0,345	0,387
21	4000	13600	18	42,45	0,378	0,352	0,372
22	4000	16000	12	45,74	0,351	0,318	0,473
23	4000	16000	15	43,8	0,354	0,323	0,444
24	4000	16000	18	39,56	0,362	0,334	0,401
25	4000	18400	12	43,1	0,33	0,284	0,659
26	4000	18400	15	38,4	0,333	0,297	0,516
27	4000	18400	18	32,18	0,337	0,307	0,43



Şekil 6. Farklı parametrelere bağlı yeniden katılan tabaka kalınlığının değişimi



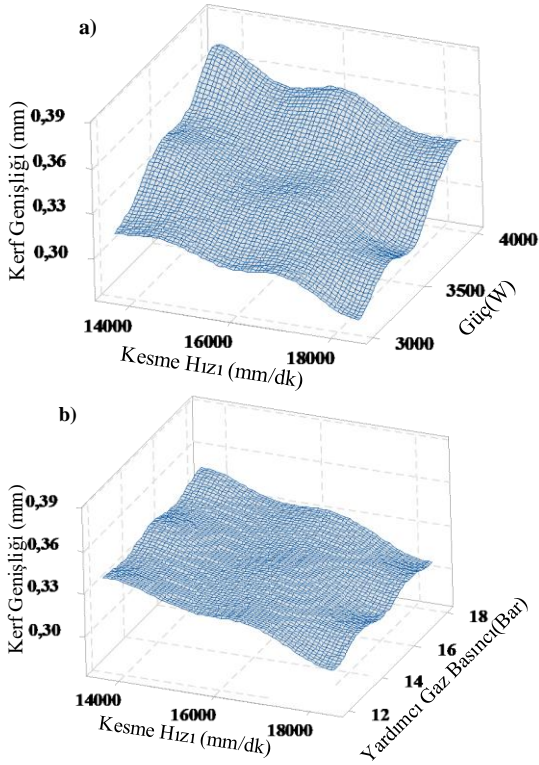
Şekil 7. Deneysel parametrelerinin yeniden katılan tabaka kalınlığına etkisi

### 3.3. Kerf Genişliği Ölçüm Sonuçları

Kerf genişliği ölçümleri, kesmenin başladığı uç noktadan başlayarak kerf boyunca parçanın üzerinden farklı noktalardan ölçülerek bu ölçümlerin ortalama değerleri alınmıştır. Ölçümler sonucunda, kesme mesafesi boyunca

uçtan sona doğru gidildikçe kerf genişliğinin arttığı tespit edilmiştir. Bu da, kesme işlemi esnasında ısının iş parçasında yarattığı ısının birikmesi ve lazer ışınına meydana gelen sapmalar neticesinde oluşmaktadır [13].

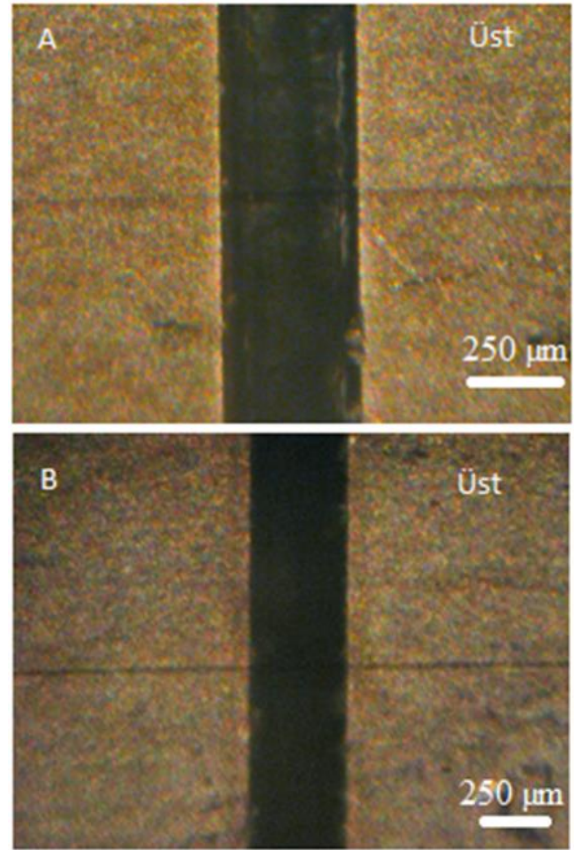
Şekil 8’de numunelerin fiber lazer ışını ile kesme işleminde kullanılan parametrelere bağlı ortalama kerf genişliği değişimleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, gücün artması ve kesme hızının düşmesi ile kerf genişliğinin önemli derecede arttığı gözlenmektedir. Gücün yüksek olduğu durumda, kesme bölgesinde oluşan sıcaklığa bağlı olarak daha fazla malzeme ergitilir ve böylelikle yardımcı gaz basıncı yardımıyla da kesme bölgesinden daha fazla malzeme kaldırılmış olur [14]. Ayrıca, düşük ilerleme değerlerinde birim zamandaki ışının kesme bölgesine etki süresi artacağından dolayı oluşan ısı malzeme yüzeyinde yoğunlaşmakta ve daha fazla hacimde malzeme ergiyerek kerf genişliği artmaktadır. Benzer sonuçlar, Lamikiz vd. [15] ve B. S. Yılbaş[14] tarafından da rapor edilmiştir.



Şekil 8. Parametrelere bağlı kerf genişliğinin değişimi.

İşlem gazının seçimi, lazer kesim işleminin kalitesi ve üretimde çok önemli bir etkiye sahiptir. Soy gazlardan argon ve helyum gazlarının titanyum alaşımlarının kesiminde tercih

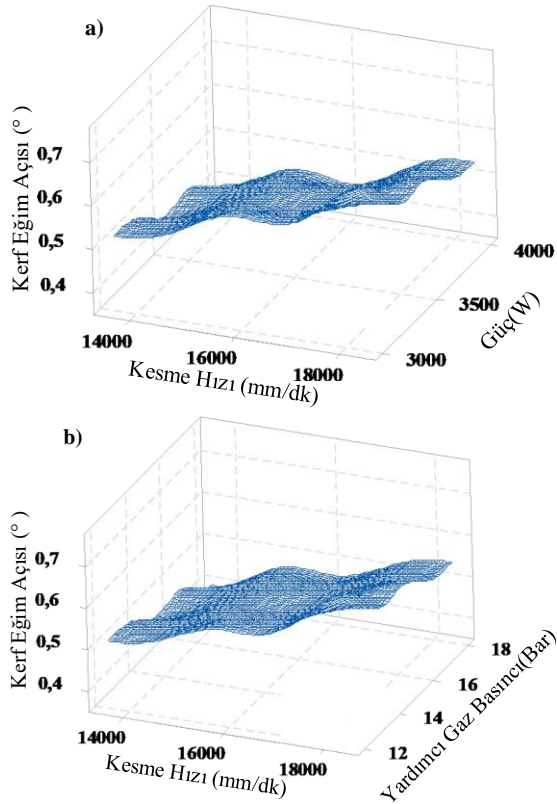
edilmektedir. Bunun sebebi, bu gazlar oksitlenmeyi ve kırılğan titanyum nitrürlerinin oluşumunu önlemeleridir. Şekil 8-b’de görüldüğü gibi, yardımcı gaz basıncının artmasıyla kerf genişliği artmaktadır. Yüksek güç değerlerinde, oluşan sıcaklığa bağlı olarak daha fazla malzeme ergitilir ve böylelikle gaz basıncı yardımıyla da kesme bölgesinden daha fazla malzeme uzaklaştırılmış olur ve böylelikle kerf genişliği artar. Numuneler içerisinde en yüksek kerf genişliği hızın en düşük, güç ve basıncın en yüksek olduğu (W=4000 watt, V=13600 mm/dak, P=18 bar) 21 no lu deney de 0,378 mm olarak ölçülmüştür. En düşük kerf genişliği ise hızın en yüksek, güç ve basıncın en düşük olduğu (W=3000 watt, V=18400 mm/dak, P=12 bar) 7 no lu deney de 0,279 mm olarak ölçülmüştür. Bu numunelere ait görüntü Şekil 9’ da verilmiştir.



Şekil 9. Lazer kesimde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi (a: 21 nolu deney w=4000watt, v=13600mm/dak, p=18bar b: 7 nolu deney; w=3000 watt, v=18400 mm/dak, p=12 bar.)

### 3.4. Kerf Eğim Açısı Ölçüm Sonuçları

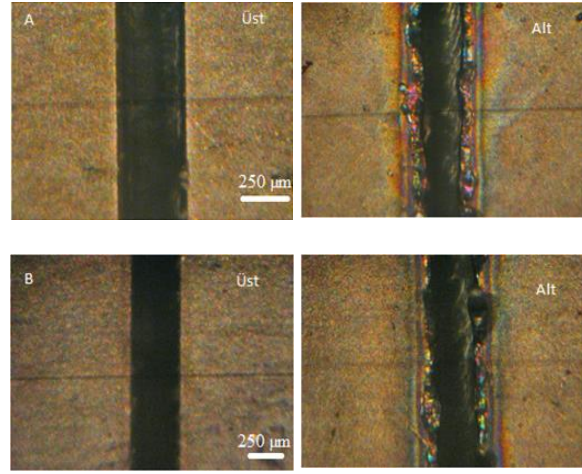
Fiber lazerde kesilen numunelerin alt ve üst kerf genişliği ölçüm sonuçlarında, bütün kesme şartlarında da alt kerf genişliğinin üst kerf genişliğinden daha küçük olduğu ve bu da lazer ışını ile kesmede kesme kanalının konik bir profilde olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. Alt ve üst kerf genişliğinde meydana gelen bu değişimin, kesme kalınlığı boyunca ışın yoğunluğunun ve gaz basıncının düşmesi, ışın odağının bozulması sonucunda ortaya çıktığı düşünülmektedir. Şekil 10' da Ti6Al4V numunelerinin ortalama kerf eğim açısının işlem parametrelerine bağlı değişimlerini gösteren grafikler toplu olarak verilmiştir.



Şekil 10. Parametrelere bağlı kerf eğim açısının değişimi.

Şekil 10'daki grafikler incelendiğinde kesme hızının kerf eğim açısı üzerindeki etkisinin büyük olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, kerf eğim açısının, artan güç yoğunluğu ve gaz basıncıyla da düştüğü tespit edilmiştir. Lazer ışınının yoğunluğunun, yüksek kesme hızlarında daha da azalması sonucunda parçanın alt kısımlarına doğru ergitilen malzeme miktarı düşer ve alt kerf

genişliğiyle üst kerf genişliği arasında fark oluşur. Ayrıca, güç ve yardımcı gaz basıncının yüksek, kesme hızının düşük olduğu durumda kerf eğim açısının değeri önemli derecede düşmektedir. Bunun sebebi, lazer ışını ile malzeme yüzeyi arasında yeterli etkileşim süresinin olması ve bu süre içinde malzeme kalınlığı boyunca ergiyen metalin yüksek gaz basıncı yardımı ile alt kısımda katılaştırmadan kesme bölgesinden uzaklaştırılmasıdır. Bu sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarla da örtüşmektedir[16].



Şekil 11. Lazer kesimde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi (a: 7 nolu deney; v=18400 mm/dak, w=3000 watt, p=12 bar, b: 21 nolu deney v=13600 mm/dak, w=4000 watt, p=18 bar)

Şekil 11' de lazer ışını ile kesilen numuneler içerisinde, kesim parametrelerine bağlı olarak değişen en düşük ve en yüksek kerf eğim açısının elde edildiği numunelere ait fotoğraflar verilmiştir. En yüksek kerf eğim açısı, kesme hızının en yüksek (18400 mm/dakika), gaz basıncının ve lazer gücünün en düşük (12 Bar, 3000 Watt) olduğu 7. deneyde 0,759° olarak ölçülmüştür. En düşük ortalama kerf eğim açısı ise, gaz basıncının ve lazer gücünün en yüksek (18 Bar, 4000 W), kesme hızının en düşük olduğu (13600 mm/dk) 21. deneyde 0,372° olarak ölçülmüştür.

### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 2mm kalınlığındaki Ti6Al4V titanyum alaşımı plaka, fiber lazer kesim yöntemi ile kesilmiştir. Yapılan deneyler sonunda, işlem parametrelerinin kesme kalitesi üzerindeki

etkileri makro ve mikro düzeyde incelenerek aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Lazer ışını ile kesilmiş numunelerin yüzey kesitleri incelendiğinde, üç farklı tabakanın olduğu görülmüştür. Bunlar; yeniden katılacak tabaka, ısıdan etkilenen bölge ve esas malzemedir. Yeniden katılacak tabaka kalınlığı özellikle lazer gücüne bağlı olarak önemli derecede artmakta ve kesme hızının artmasıyla azalmaktadır.
- Ortalama kerf genişliğinin artmasında güç ve hızın etkisi önemli rol oynarken gaz basıncının da kısmen etkili olduğu belirlenmiştir. Kerf genişliği, kesme hızı azalırken güç artışıyla kademeli olarak artmaktadır. Yoğun ısı sonucu ergiyen malzeme, gaz basıncı yardımıyla ortamdan atılarak kerf genişlemesine sebep olmaktadır. Deneyler sonucunda kerf genişlik değerlerindeki değişimlerin güç ve yardımcı gaz basıncı ile doğru, kesme hızı parametresiyle ters orantılı olduğu saptanmıştır.
- Kerf eğim açısı, güç ve yardımcı gaz basıncının yüksek, kesme hızının düşük olduğu durumda önemli derecede düşmektedir. Bunun nedeni, lazer ışını ile malzeme yüzeyi arasında yeterli temas süresinin olması ve bu süre içinde malzeme kalınlığı boyunca ergiyen metalin yüksek gaz basıncı yardımı ile alt kısımda katılaşmadan kesme bölgesinden uzaklaştırılmasıdır.

## 5. Kaynaklar

1. Meshram, S.D., Mohandas T. (2010). A comparative evaluation of friction and electron beam welds of near-a titanium alloy. *Mater Design*, **31(22)**:45–52.
2. Varkey, A.P., Kuriakose, S., Unni, V.N. (2014). Optimization of edge quality during CO<sub>2</sub> laser cutting of titanium alloy. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, **1(11)**:110-117.
3. Scintilla, L.D., Palumbo, G., Sorgente, D., Tricarico L. (2013). Fiber laser cutting of Ti6Al4V sheets for subsequent welding operations: Effect of cutting parameters on butt joints mechanical properties and strain behavior. *Materials and Design*, **47**:300–308, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.014>.
4. Pandey, A.K., Dubey, A.K. (2012). Simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of titanium alloy sheet. *Opt Laser Technol*, **44(18)**:58–65.
5. Joseph, R. D. (1989). *ASM Metals Handbook. Machining*, 16: 579–587, ISBN: 0871700220.
6. Rao, B.T., Kaul, R., Tiwari, P., Nath, A.K. (2005). Inert gas cutting of Titanium sheet with pulsed mode CO<sub>2</sub> laser. *Optics and Lasers in Engineering*, **43(13)**:30–48.
7. Shanjin, L., Yang, W. (2006). An investigation of pulsed laser cutting of Titanium alloy sheet. *Optics and Lasers in Engineering*, **44(10)**:67–77.
8. Andersson, N., Granberg, C. (2015). Laser cutting in Ti-6Al-4V sheet: DOE and evaluation of process parameters Informative. Master thesis. Department of Materials and Manufacturing Technology. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
9. Stelzera, S., Mahrlea, A., Wetziga, A., Beyer, E. (2013). Experimental investigations on fusion cutting stainless steel with fiber and CO<sub>2</sub> laser beams. *Physics Procedia* **41**:399 – 404
10. Powell, J., Kaplan, A.F.H. (2012). A technical and commercial comparison of fiber laser and CO<sub>2</sub> laser cutting. In: *Proceedings of ICALEO*, 277–281.
11. Sen, A., Doloi, B., Bhattacharyya, B. (2014). Experimental Studies on Fibre Laser Micro-Machining of Ti-6Al-4V, 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014), Guwahati, Assam, India.
12. Hamoudi, W.K. (1996). The effects of speed and processing gas on laser cutting of steel using a 2 kW CO<sub>2</sub> laser. *International Journal for Joining of Materials*, **9 (1)**:31–36.
13. Rajaram, N., Sheikh-Ahmad, J., Cheraghi, S.H. (2003). CO<sub>2</sub> laser cut quality of 4130 steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **43**:351–358.
14. Yilbas, B.S. (2004). Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis. *Journal of Materials Processing Technology* **155**:2106–2115
15. Lamikiz, A, Lacella, L.N.L., Sanchez, J.A., Pozo, D.D., Etayo, J.M., Lopez, J.M. (2005). CO<sub>2</sub> laser cutting of advanced high strength steels (AHSS). *Appl Surf Sci*, **242**:362–8.
16. Powell, J., Al-Mashikhi, S.O., Kaplan, A.F.H., Voisey, K.T. (2011). Fibre laser cutting of thin section mild steel: An explanation of the ‘striation free’ effect. *Optics and Lasers in Engineering*, **49**:1069–1075





## Faz Değiştiren Malzeme İçeren Silindirik Bir Isıl Enerji Deposunda Kanatçık Sayısı, Kalınlığı ve Üniform Olmayan Kanatçık Dağılımının Isıl Enerji Depolama Karakteristiği Üzerindeki Etkileri

Çiğdem SUSANTEZ\*, Kamil KAHVECİ\*, Erhan AKYOL\*

\*Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 22030 Edirne  
cigdemsusantez@trakya.edu.tr

(Geliş/Received: 04.04.2018; Kabul/Accepted:07.08.2018)

### Özet

Faz değiştiren malzemeler yüksek ısı depolama özellikleri nedeniyle ısı enerji depolamada sıklıkla kullanılır. Fakat bunların ısı iletkenliklerinin düşük olması söz konusu uygulamalarda dezavantajdır ve birim zamanda depolanan ısı enerji miktarını arttırabilmek için ısı iletkenliği yüksek kanatçıklar kullanılır. Bu çalışmada faz değiştiren malzeme içeren silindirik bir ısı enerji deposunda üniform olmayan kanatçık dağılımının, kanatçık sayısı ve kalınlığının ısı enerji depolama karakteristiği üzerindeki etkileri Comsol sonlu elemanlar modelleme ve simülasyon programı vasıtasıyla incelenmiştir. Sistemin on iki saatlik yükleme süresi sonunda, üniform kanatçık dağılımında olduğu gibi üniform olmayan kanatçık dağılımında da sistemde depolanan enerjinin kanatçık sayısı ile önemli miktarda arttığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Faz değiştiren malzemeler, Isıl depolama, Kanatçık, Üniform olmayan kanatçık dağılımı

## Effects of the Number, Thickness and Non-uniform Distribution of Fins on the Heat Storage Characteristics in a Cylindrical Thermal Energy Storage with Phase Change Material

### Abstract

Phase change materials are commonly used in thermal energy storage due to their high thermal storage properties. However, their low thermal conductivities are disadvantageous for practical applications and fins with high thermal conductivity are used in order to increase the amount of energy stored. In this study, effects of the non-uniform distribution, number and thickness of fins on the heat storage characteristics in a cylindrical thermal energy storage system with phase change material have been investigated by Comsol Multiphysics finite element modeling and simulation software. It has been observed that at the end of the twelve-hour charging period, stored energy in the system increased considerably with the number of fins for the non-uniform fin distribution as in uniform fin distribution.

**Keywords:** Phase change materials, Thermal storage, Fin, Non-uniform fin distribution

### 1. Giriş

Faz değiştiren malzeme (FDM) ler yüksek ısı depolama özellikleri nedeniyle güneş enerjisinin depolanması, biyoiklimsel binalarda pasif soğutma, yiyeceklerin ve elektronik aletlerin korunması, araçların ısı konforu, motorların soğutulması, uzay araçlarının termal sistemleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. [1] Isıl enerji depolama sistemleri yükleme, boşalma ve bekleme olmak üzere üç evrede çalışmaktadır. Yükleme evresi güneş enerjisinin depo edildiği gündüz vakti olup, bu evrede akışkan sisteme FDM'nin erime sıcaklığından daha yüksek bir

sıcaklıkta girmektedir. Bu esnada eriyen FDM enerjinin bir bölümünü depo etmektedir. Böylece FDM'nin yüksek erime ısısı nedeniyle FDM'li ısı enerji depolama sisteminde, bir malzemenin ısıtılmasına dayanan sisteme nazaran aynı hacimde daha fazla enerji depo edilebilmektedir [2]. Bilindiği üzere faz değiştiren malzemelerin ısı iletkenliği bağıl olarak düşüktür. Dolayısıyla FDM'ye olan ısı transferini arttırabilmek için ısı iletkenliği yüksek malzemelerle kullanılma yoluna gidilir.

Ogoh ve Groulx [2], üniform kanatçık dağılımlı silindirik bir ısı enerji depolama sisteminde farklı kanatçık sayılarının sistemin

depolama özellikleri üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Bu sistemde kullanılan faz değiştiren malzemenin ısı iletkenliği 0.21 W/mK olup, sistemin ısı iletkenliğini dolayısıyla birim zamanda sistemde depolanan duyulur ve gizli ısı formundaki toplam enerjiyi arttırmak için sisteme ısı iletkenliği yüksek bakır kanatçıklar ilave etmişlerdir. Faz değiştiren malzemenin erimesi sırasında depolanan büyük miktardaki gizli enerjiyi hesaba katmak için efektif ısı kapasite metodunu kullanmışlardır. Analizlerini sıcak suyun 0.05 ve 0.5 m/s giriş hızları için ve 0 ila 27 kanatçık durumu için yapmışlar, birim zamanda faz değiştiren malzemeye olan toplam ısı transferinin kanatçık sayısındaki artış ile önemli miktarlarda arttığını gözlemlemişlerdir. Analizlerini 12 saatlik yükleme süresi için gerçekleştiren Ogoh ve Groulx [2], sistemde depolanan toplam enerjinin 12 kanatçığa kadar lineer bir artış gösterdiği sonucuna varmışlardır. Shatikian [3] ısı depolama sisteminde faz değiştiren malzemenin erime ve katılaşmasını nümerik olarak incelemiştir. İncelediği sistemde alüminyum kanatçıklar arasındaki faz değiştiren malzemede taşınım mekanizmasını ve faz değişimi sırasında FDM'deki hacim değişimini hesaba katarak ısı transferinin, erime hızının ve erime cephesinin geometriden nasıl etkilendiğini belirlemiştir. Augspurger ve Udaykumar [4], NaNO<sub>3</sub> ve KNO<sub>3</sub> karışımı faz değiştiren malzeme içeren ve alüminyum kanatçıkların kullanıldığı bir ısı enerji deposunun ısı performansını dört farklı kanatçık tasarımı için nümerik olarak incelemişlerdir. Güneş ocağı olarak kullanılan bu ısı enerji deposunun dört farklı tasarımını ısıyı eşit ve hızlı yayma kabiliyeti ve pişirmede cihazdan çekilebilecek ısı miktarı baz alınarak karşılaştırmışlardır. Isıyı absorbe etme ve verme kabiliyetleri açısından en iyi tasarımın en fazla kanatçık sayısına sahip olan tasarım olduğunu görmüşlerdir. Groulx ve Ogoh [5], bakır boru içerisinde sıcak suyun aktığı, FDM olarak parafinin kullanıldığı silindirik bir ısı enerji deposundaki sıcaklık dağılımını farklı kanatçık sayılarında ve farklı su giriş hızlarında nümerik olarak incelemişlerdir. Kanatçık sayısının ısı enerji deposunun depoladığı ısı üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu ve ısı transferinin sıcak suyun girişinde önemli mertebelerde daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Abdulateef ve diğ.

[6] kanatçıkların kullanıldığı FDM'li ısı enerji depolama sistemleri üzerine yapılan çalışmaları incelemişlerdir. En iyi ısı performansın silindirik ısı enerji deposunda boyuna kanatçıkların olduğu sistemlerde görüldüğü, FDM'ye etkin bir şekilde temas eden dairesel kanatçıkların ise pim şeklindeki kanatçıklardan sistemin ısı performansı açısından daha etkin olduğu sonucuna varmışlardır. Genel olarak kanatçık sayısı ve boyutu arttığıca kanatçık ve FDM arası ısı transferi yüzey alanı arttığından ısı performansın arttığını vurgulamışlardır. Paria ve diğ. [7] içerisinden damıtık suyun aktığı, dairesel kanatçıklı ve FDM'li silindirik bir ısı enerji deposunda FDM'nin erime ve katılaşması üzerine yaptıkları deneysel ve nümerik çalışmada Reynolds sayısının 1000'den 2000'e çıkmasının erime süresini %58 azalttığını ve Reynolds sayısındaki artışın erime evresinde sıcaklıktaki dalgalanmayı azalttığını, teorik verimi ise arttırdığını belirlemişlerdir. Murray ve Groulx [8] ele aldıkları iki boyutlu kare şeklindeki bir alan içerisinde FDM'nin erime davranışını iletimin yanında taşınım mekanizmasını da hesaba katarak modellemişlerdir. Ele alınan geometrinin alt ve üst yüzeyleri yalıtımlı iken, sol yüzeyi sıcak, sağ yüzeyi ise aynı zamanda başlangıç sıcaklığı olan faz değişim sıcaklığındadır. Analizlerinde eriyen FDM'nin sirkülasyon oluşturarak katı sıvı ara yüzeyini hareket ettirdiği görülmüştür. Murray ve Groulx [8] bu çalışmada aynı zamanda sisteme kanatçık eklendiğinde erimenin daha fazla olduğunu görmüşlerdir. Rozenfeld ve diğ. [9] içerisinde sıcak suyun akmasına izin verilen ve üzerinde üç adet boyuna kanatçık olan silindirik bir boru ihtiva eden, FDM'li silindirik bir ısı enerji deposunda sistemin dış kısmından ısı vererek yakın temas erime mekanizmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu şekilde erime süresinin 2.5 kat azaldığını gözlemlemişlerdir. Rozenfeld ve diğ. [9] geliştirdikleri teorik modeli deneysel sonuçlarla doğrularak erime oranının Fourier ve Stefan sayılarına bağlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Arena ve diğ. [10] FDM'li silindirik bir ısı enerji deposunun faz değişimini deneysel ve geliştirdikleri iki boyutlu bir eksenel simetrik model kullanarak nümerik olarak incelemişlerdir. Konveksiyonla olan ısı transferinin etkisini nümerik modellerinde hesaba katmışlar ve sonuçları momentum denkleminde

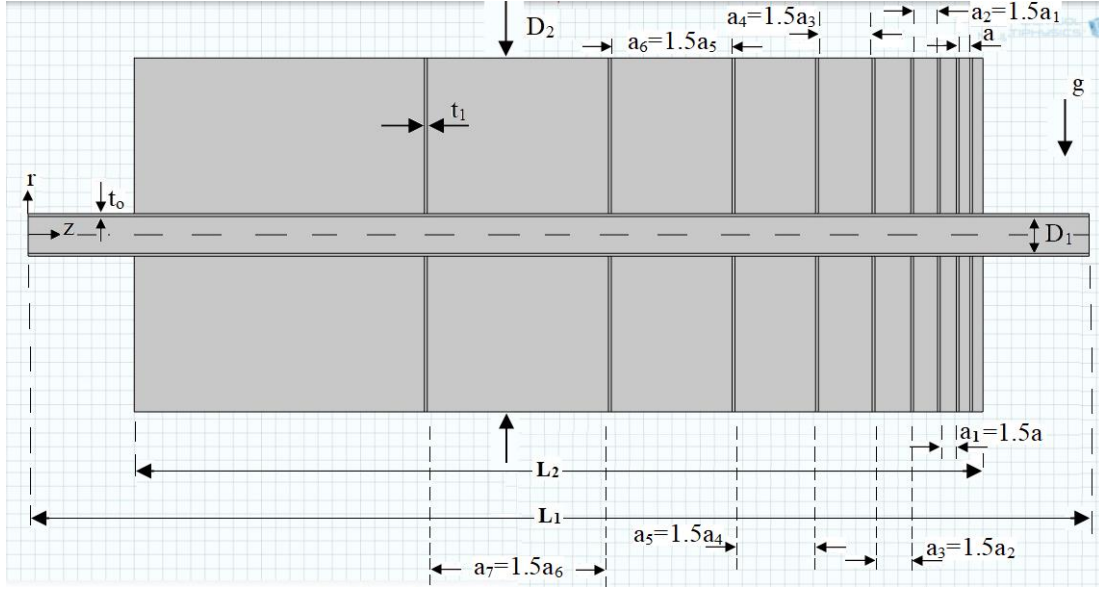
yer alan erimiş bölge katsayısı  $A_{mush}$ 'ın  $10^4, 10^6$  ve  $10^8$  değerleri için elde etmişlerdir. Yükleme evresi süresince, bu katsayının  $10^4$  değeri için faz değişim cephesinin aşağı doğru bir eğri oluşturduğu, boşalma evresi süresince ise erimiş bölge katsayısının farklı değerlerinde faz değişim cephesinin geometrisinin değişmediği sonucuna varmışlardır. Kazemi ve diğ. [11] boyuna kanatçıklı, FDM'li bir ısı enerji depolama sisteminde iki ve üç kanatçıklı düzenlemelerde kanatçık açılarının faz değiştiren malzemenin erime davranışı üzerindeki etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında FDM içinde taşınım mekanizmasını hesaba katan Kazemi ve diğ. [11], üç kanatçıklı durum için kanatçık açılarını  $60^\circ$ 'den  $120^\circ$ 'ye çıkarmanın toplam erime süresini kısalttığı, iki kanatçıklı durum için ise açı değerini  $150^\circ$ 'den  $45^\circ$ 'ye düşürmenin erime süresini kısalttığı sonucuna varmışlardır. Üçlü ve ikili kanatçıklar arasında en iyi durumun basit bir sisteme göre erime sürelerini sırasıyla %22.5 ve %62 azalttığını görmüşlerdir. Liu ve Groulx [12] kanatçıklı ısı enerji depolama sisteminde erimeyi farklı kanatçık sayı ve uzunlukları için nümerik olarak incelemişlerdir. Sıvı fazındaki doğal konveksiyonu Boussinesq yaklaşımını uygulayarak hesaba kattıkları çalışmalarında, kanatçık uzunluğu ve konumunun ısı transfer miktarı üzerinde, doğal konveksiyonun ise sıvı-katı ara yüzeyinin konumu üzerinde önemli etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Rudonja ve diğ. [13] boyuna dikdörtgen kanatçıklar ve merkezinde aksel olarak yerleştirilmiş ısı kaynağı ihtiva eden dikey silindirik FDM'li bir ısı enerji deposu üzerinde deneysel ve nümerik bir çalışma yapmışlardır. FDM'nin sıvı fazındaki doğal taşınımı Boussinesq yaklaşımıyla

modelledikleri nümerik çalışmalarında ısı enerji deposunun dış yüzeylerini erime süresince termal izolasyonlu kabul etmişler ve merkezdeki aksel ısı kaynağından ısı akısını deneysel verilerinden elde ettikleri bir eşitlikle ifade etmişlerdir. Nümerik model ve deneysel çalışma sonuçlarının örtüşüğünü gören Rudonja ve diğ. [13], ısı enerji deposu içerisindeki FDM'nin erime süresinin kanatçık yüzey alanındaki artış ile üssel olarak azaldığı sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmada da Ogoh ve Groulx'un [2] çalışmasında olduğu gibi FDM'li silindirik bir ısı enerji deposunun yükleme evresi çalışılmıştır. Farklı olarak bu çalışmada üniform olmayan kanatçık dağılımında kanatçık sayısı ve kalınlığının ısı enerji depolama karakteristiği üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada geometrisi Şekil 1.'de verilen, içerisinden sıcak su akan ısı enerji depolama sistemi 12 saatlik yükleme süresi boyunca analiz edilmiştir. Silindirik yapıda olan sistemin içinde yer alan borudan sıcak su akmaktadır, dışı ise faz değiştiren malzeme ile doludur. Bilindiği üzere faz değiştiren malzemelerin ısı iletkenlikleri bağıl olarak düşüktür. Sisteme giren sıcak sudan FDM'ye olan ısı transferini arttırabilmek amacıyla ısı iletkenliği yüksek bakır kanatçıklar kullanılmıştır. İçerisinden sıcak suyun aktığı boru malzemesi bakır kabul edilmiş, böylelikle borudan kanatçıklara ve sıcak boruya temaslı FDM'ye etkin bir ısı transferi amaçlanmıştır. Geometrik ölçüler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Geometri ve koordinat sistemi

Tablo 1. Geometrik ölçüler

İç boru uzunluğu	$L_1=1.5\text{m}$
Depo uzunluğu	$L_2=1.2\text{m}$
İç boru çapı	$D_1=52\text{mm}$
Depo çapı	$D_2=500\text{mm}$
Boru et kalınlığı	$t_0=4\text{mm}$
Kanatçık kalınlığı	$t_1=2\text{mm}, 4\text{mm}, 8\text{mm}$

Kanatçıkların daha sık olduğu uç kısımda, kanatçık ile ısı deposu arasındaki uzaklık,

en dar kanatçık mesafesi  $a$  (15mm) kadar olup, diğer kanatçıklar arasındaki mesafe bir önceki mesafenin 1.5 katı olacak şekilde bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Maksimum kanatçık sayısı 9 alınmıştır. Suyun giriş hızı  $u_0 = 0.02\text{m/s}$  seçilmiştir. Su ve bakırın termofiziksel özellikleri ile birlikte ele alınan FDM'nin termofiziksel özellikleri sıvılaştırma ve katılaştırma sıcaklıkları da dahil olmak üzere Tablo 2 de yer almaktadır.

Tablo 2. Materyallerin termofiziksel özellikleri

Madde	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c$ (J/kgK)	$k$ (W/mK)	$\mu$ (kg/ms)	Ref.
Su	997.1	4180	0.609	0.00089	[14]
Bakır	8960	385	398		[14]
PCM (RT 44HC) $T_s = 41^\circ\text{C}, T_l = 44^\circ\text{C}$ $L=220000\text{J/kg}$	750	2000	0.2		[15]

Çalışmada termofiziksel özellikler sabit, akışkan sıkıştırılmaz ve Newtonien kabul edilmiştir. Yerçekimi etkileri ihmal edilmiştir ve tüm dış yüzeyler yalıtımlı varsayılmıştır. İki

boyutlu eksenek simetrik akışa ait yönetici denklemler ve sınır şartları aşağıda verilmiştir.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_{su} \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu_{su} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{v_r}{r^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho_{su} \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu_{su} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho_{su} c_{su} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k_{su} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \phi \quad (4)$$

$$\Phi = \mu_{su} \left( 2 \left( \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{v_r}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right) + \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 \right) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} v_z(r, z = 0, t) &= u_o = 0.02 \text{ m/s} \\ v_r(r, z = 0, t) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} v_z(r = r_p, z, t) &= 0 && \text{duvarlarda} \\ v_r(r = r_p, z, t) &= 0 && \text{kaymama şartı} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial v_z}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad \begin{array}{l} \text{eksenel} \\ \text{simetri} \end{array} \quad (8)$$

$$T(r, z = 0, t) = T_{in} = 85^\circ \text{C} \quad (9)$$

$$P(r, z = L_1, t) = 0 \quad (10)$$

$$-\vec{n} \cdot (-k_{su} \vec{\nabla} T) \Big|_{r, z = L_1, t} = 0 \quad (11)$$

Çalışmada yer alan katı kısımlar (FDM hariç) için ise denklem ve sınır şartları aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \rho_i c_i \frac{\partial T}{\partial t} &= \\ k_i \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) & \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \vec{n} \cdot (\vec{q}_1 - \vec{q}_2) &= 0 \\ T_1 &= T_2 \end{aligned} \quad (13)$$

Su-boru, boru-FDM,  
boru-kanatçık,  
kanatçık-FDM temas yüzeylerinde

FDM için yönetici denklem aşağıda verilmiştir. FDM için konveksiyonla olan ısı transferi, söz konusu hacimler küçük ve viskoz etkiler yüksek olduğu için ihmal edilmiştir.

$$\rho_{FDM} c_{FDM} \frac{\partial T}{\partial t} = \quad (14)$$

$$k_{FDM} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S_H$$

$$S_H = -\rho_{FDM} L \frac{\partial \beta}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (15)$$

Erime oranı  $\beta$  aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned} 0 & \quad T \leq T_s \\ \beta &= \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \quad T_s < T < T_l \\ 1 & \quad T \geq T_l \end{aligned} \quad (16)$$

Başlangıç şartları:

$$\begin{aligned} v_z(r, z, t = 0) &= u_o, \\ v_r(r, z, t = 0) &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$T(r, z, t = 0) = T_o = 20^\circ \text{C} \quad (18)$$

$$P(r, z, t = 0) = 0 \quad (19)$$

Tüm sistem dış yüzeyleri yalıtımlı olup  $\vec{n}$  yüzey normali olmak üzere buralarda aşağıdaki sınır şartı geçerlidir.

$$\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = 0 \quad (20)$$

Isıl enerji deposunda depo edilen toplam, duyulur ve gizli ısılar aşağıdaki gibi formüle edilmiştir. Burada Ogoh ve Groulx [2]'un çalışmasında olduğu gibi yalnızca FDM'de depo edilen enerjiler hesaba alınmış, ince olduklarından, ısı depolama kabiliyetleri düşük olduğundan kanatçıklarda depo edilen ısı hesaba alınmamıştır. Ogoh ve Groulx [2]'u çalışmasında verilen toplam enerji formülü bu çalışmada aşağıdaki gibi modifiye edilmiştir.

FDM'de depolanan toplam enerji:

$$E_T = m_{FDM} \frac{\iiint (c_{FDM}(T - T_o) + L \frac{\partial \beta}{\partial T} (T_l - T_s)) r dr d\theta dz}{\iiint r dr d\theta dz} \Big|_{T_s < T < T_l} \quad (21)$$

FDM'de depolanan duyulur enerji:

$$E_{duyulur} = m_{FDM} \frac{\iiint c_{FDM}(T - T_o) r dr d\theta dz}{\iiint r dr d\theta dz} \quad (22)$$

FDM’de depolanan gizli enerji:

$$E_{gizli} = m_{FDM} \frac{\iiint L \frac{\partial \beta}{\partial T} (T_l - T_s) \Big|_{T_s < T < T_l} r dr d\theta dz}{\iiint r dr d\theta dz} \quad (23)$$

(21) ve (23) denklemlerinde yer alan  $L \frac{\partial \beta}{\partial T} (T_l - T_s)$  terimi sıcaklık FDM’nin faz değişim aralığında ise aktif olmakta, değil ise sıfır değerini almaktadır.

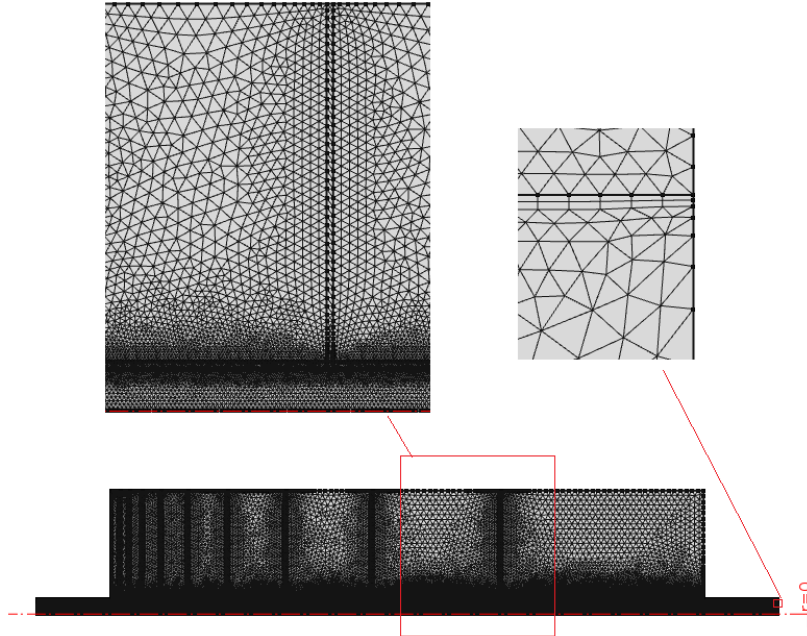
FDM’de depo edilebilecek maksimum enerji  $E_{max}$  ve ısıl enerji deposunun verimi aşağıdaki şekilde gibi ifade edilmiştir.

$$E_{max} = \frac{m_{FDM} \iiint (c_{FDM}(T_{in} - T_o) + L) r dr d\theta dz}{\iiint r dr d\theta dz} \quad (24)$$

$$\eta = \frac{E_T}{E_{max}} \quad (25)$$

FDM’de depo edilebilecek maksimum enerji, FDM’nin sıcaklığı sıcak suyun giriş sıcaklığına ulaştığı ve FDM’nin tamamen eridiği durum göz önüne alınarak modellenir. Bir diğer ifadeyle FDM’de depo edilecek gizli ve duyulur ısıların maksimum olduğu duruma karşılık gelir.

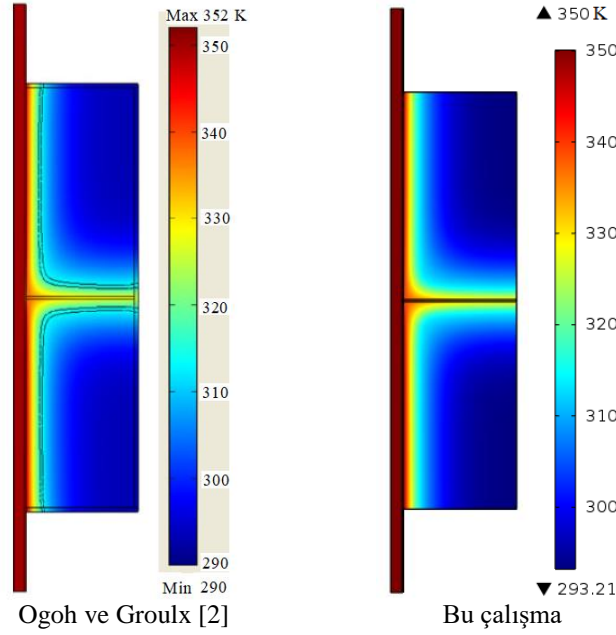
Çalışmada meshe bağımlılık analizi yapılmış ve uygun mesh değeri maksimum eleman boyutu  $1.2 \cdot 10^{-2}m$ , minimum eleman boyutu  $2.4 \cdot 10^{-5}m$  olarak tespit edilmiştir. Çalışmada üçgen mesh tipi ağırlıklı olarak kullanılmış olup, hız sınır tabakanın oluşacağı borunun cidara yakın i kısımları dikdörtgen mesh ile meshlenmiştir. Bu durum, şekil 2’de büyütölmüş kısımlarda da detaylıca görölmektedir. şekil 2’den de göröldüğu gibi kenar ve köşelerde daha sıkı mesh kullanılmıştır. Diğer yandan eleman sayısı farklı kanatçık sayıları ve kalınlıkları için değişmektedir. En fazla eleman sayısı  $t_1=4mm$  kanatçık kalınlığı ve 9 kanatçıklı durum için olup 62360’dır. Kanatçıksız durum için ise eleman sayısı 58909’dur.



şekil 2. Meshli geometri

Ogoh ve Groulx [2] ısıl enerji deposunun üzerinde 10 mm kalınlığında yalıtım tabakası olduğunu varsaymıştır. Bu çalışmada etkisi ihmal edilebilir mertebede olduğundan yalıtım malzemesi hesaba katılmayarak sistem dış yüzeyi

adyabatik alınmıştır. Su giriş hızı 0.05m/s için elde edilen sonuçlar şekil 3’de de göröldüğu gibi Ogoh ve Groulx [2]’un çalışması ile karşılaştırma yapılarak doğrulanmıştır.

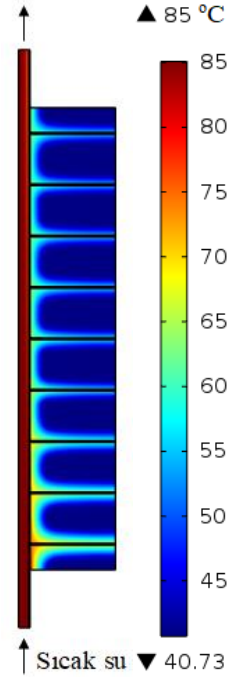


Şekil 3. 12 saat sonunda tek kanatçıklı bir ısı enerjisi deposunda sıcaklık dağılımı

Bu çalışmada üniform olmayan kanatçık dağılımına sahip ve silindirik bir FDM ısı enerjisi deposu için 12 saatlik yükleme evresi süresince, farklı kanatçık sayısı ve kalınlıklarının ısı enerjisi depolama karakteristiği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İncelenen geometride üniform olmayan kanatçık dağılımlı silindirik ısı enerjisi deposunda sıcak suyun çıkışında kanatçık sıklığı daha fazladır.

### 3. Bulgular ve Değerlendirme

Yapılan analizlerde Şekil 4'den de görüldüğü üzere sıcak suyun girişinde ısı enerjisi deposuna daha fazla ısı geçişi olmaktadır. Ogoh ve Groulx [2] ise çalışmalarında bu konuya değinmişler ve çıkışa yakın kısımlarda kanatçık sıklığı aratacak şekilde bir tasarımın uygun olacağını vurgulamışlardır. Bu çalışmada ele alınan tasarım bu şekilde bir tasarımdır. Sayısal hesaplamalar Comsol sonlu elemanlar modelleme ve simülasyon programı kullanılarak elde edilmiştir.

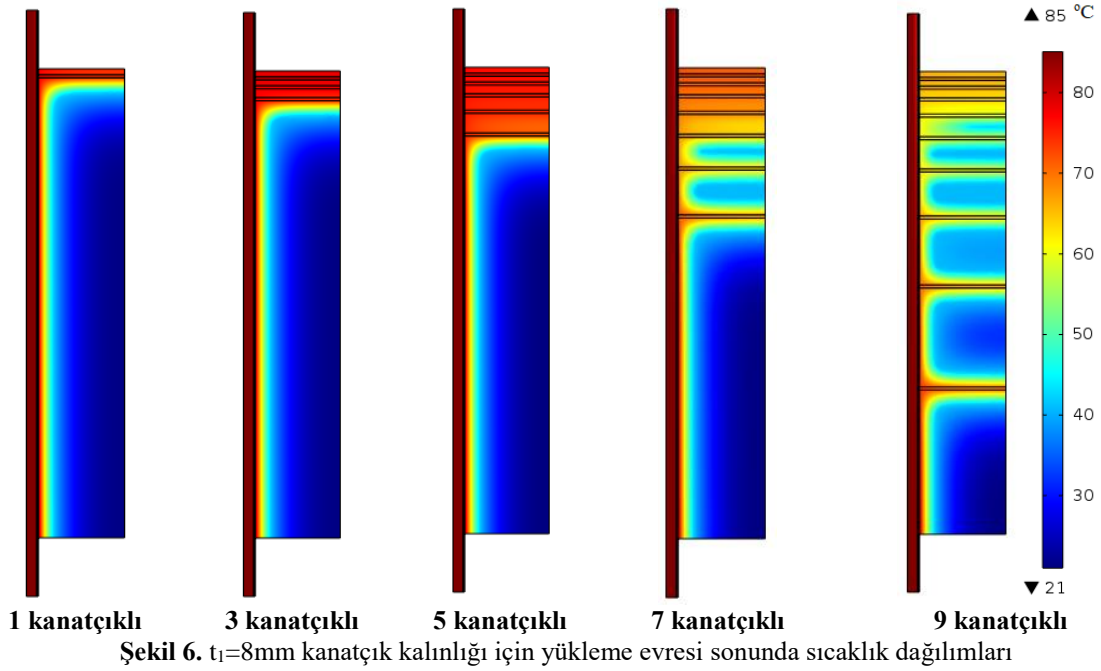
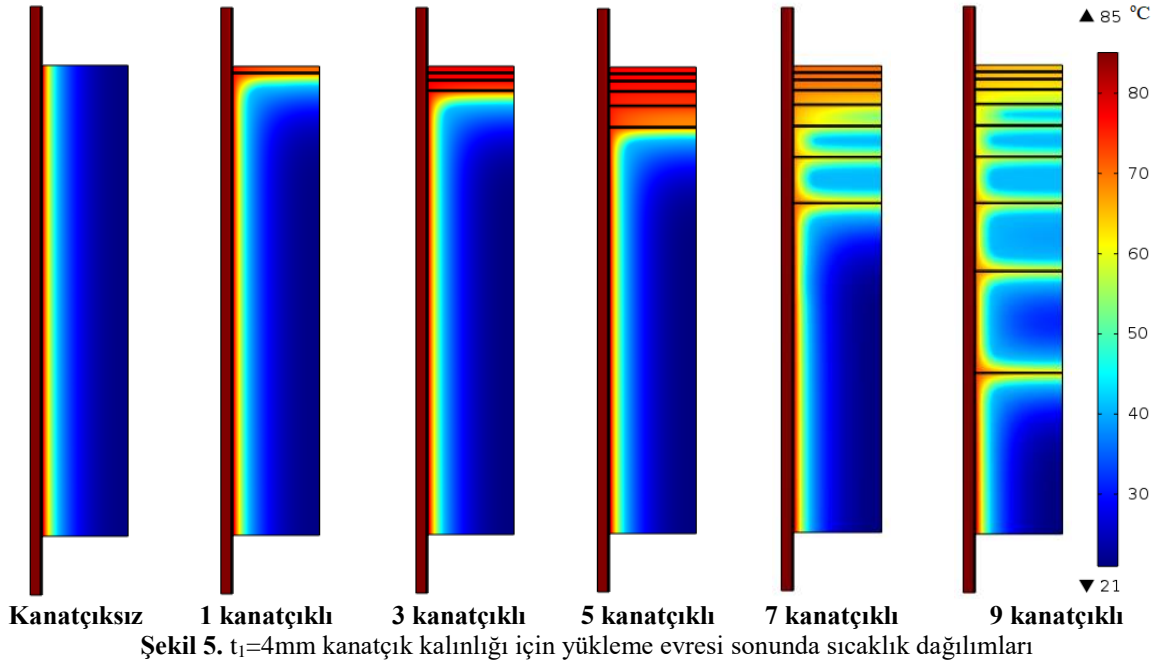


Şekil 4. Yükleme evresi sonunda üniform 9 kanatçıklı bir ısı enerjisi deposunda sıcaklık dağılımı ( $t_1=4\text{mm}$ )

Şekil 5 ve 6'da sırasıyla  $t_1=4\text{mm}$  ve  $t_1=8\text{mm}$  kanatçık kalınlıkları için 12 saatlik yükleme süresi sonunda üniform olmayan kanatçık dağılımına sahip ısı enerjisi deposunda sıcaklık dağılımları görülmektedir. Sisteme sıcak su  $85^\circ\text{C}$ 'de girmekte olup, suyun çıkışında kanatçık

sıklığı daha fazladır. Isıl iletkenliği yüksek bakır kanatçıkların kullanılmasının FDM'ye olan ısı geçişini arttırdığı görülmüştür. 3 ve 5 kanatçık kullanılması durumunda ısıl enerji depolama sisteminde sıcak suyun çıkış bölgesinde FDM'de daha yüksek sıcaklıklar elde edilmiştir. Kanatçık sayısı daha da artırıldığında sıcak suyun taşıdığı enerji FDM de daha homojen bir yapıda yer almaktadır. Kanatçık kalınlığının artırılması ile

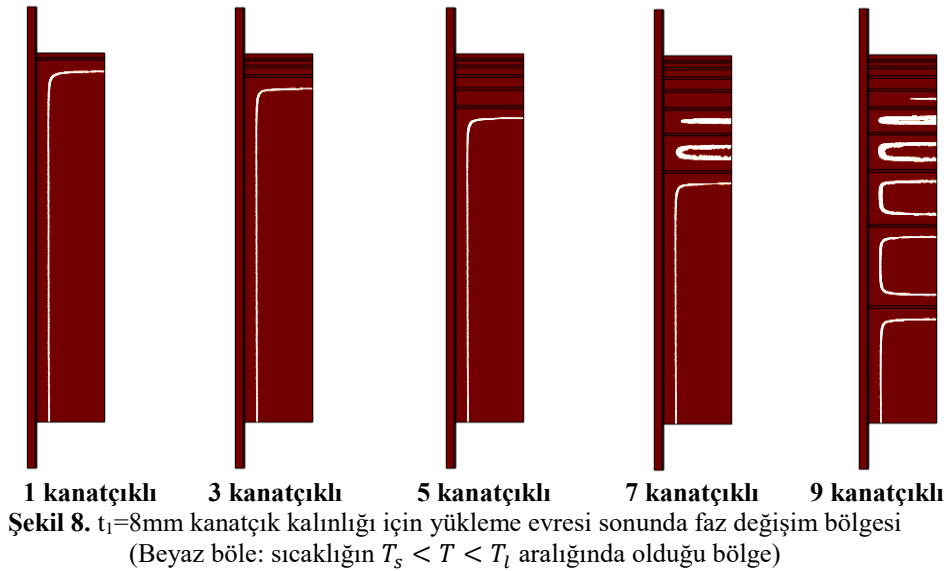
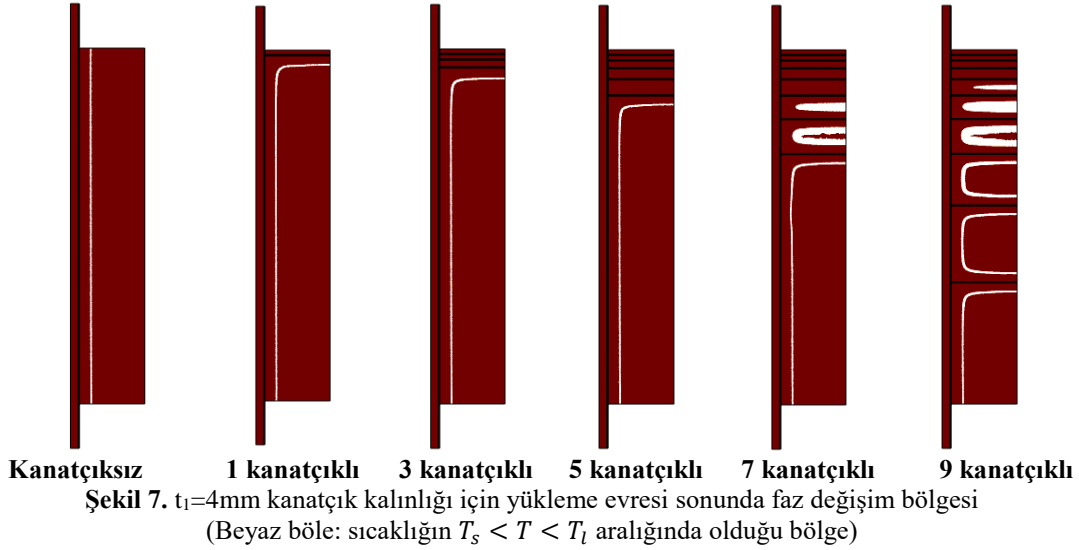
FDM'ye olan ısı geçişi de artmaktadır. şekil 5 ve 6 göstermektedir ki üniform olmayan kanatçık dağılımında kanatçık sayısı arttığında, Ogoğ ve Groulx [2]'un çalışmasında olduğu ve şekil 4'de de analiz edilen üniform kanatçık dağılımlı ısıl enerji deposundaki gibi sıcak suyun girişine yakın olan kanatçıklardan ısıl enerji deposuna ısı geçişi daha fazla olmaktadır.





Bu çalışmada faz değişimi FDM sıcaklığı  $41^{\circ}C < T < 44^{\circ}C$  olduğu bölgede gerçekleşmektedir. Yükleme süresi sonunda faz değişiminin olduğu bölgeler Şekil 7 ve 8’de beyaz renkte gösterilmiştir. Faz değişim bölgesi 5 kanatçığa kadar  $t_1=4\text{mm}$  ve  $t_1=8\text{mm}$  durumları için neredeyse aynı büyüklükte olup, 5 kanatçıktan sonra  $t_1=4\text{mm}$  olması durumunda daha geniş bir alan kaplamaktadır. Şekil 9’da

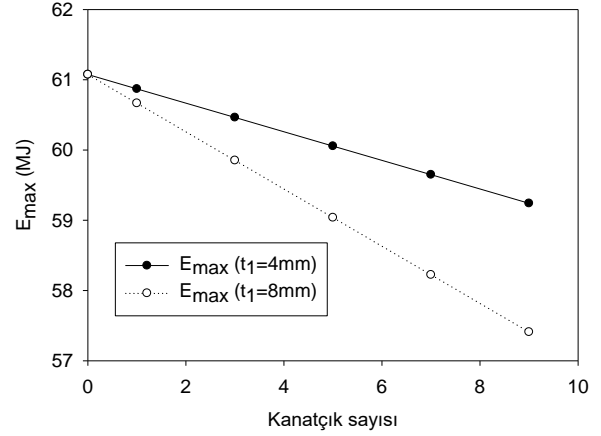
yükleme süresi sonunda FDM’de depolanan gizli ısı değerinin 5 kanatçıktan sonra  $t_1=4\text{mm}$  kanatçık kalınlığında daha fazla olması bu sonucu doğrular bir durumdur. Şekil 7 ve 8 göstermektedir ki üniform olmayan kanatçık dağılımına sahip bu sistemde özellikle 5 kanatçıktan sonra, Ogoh ve Groulx [2]’un çalışmasında olduğu gibi kanatçık sayısı ile eriyen FDM miktarında artış görülmektedir.



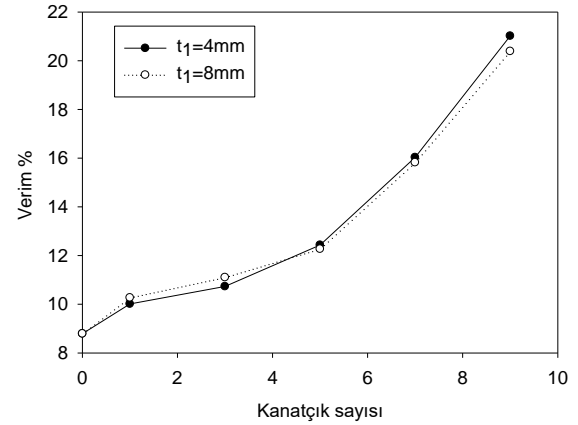
Şekil 9’dan yükleme süresi sonunda 5 kanatçıktan sonra gizli ısı değerinde kanatçık sayısı ile birlikte artış olduğu görülebilir. Yine Şekil 9’dan FDM’de depolanan duyulur ısının da kanatçık sayısı ile neredeyse lineer bir artış

gösterdiği, fakat kanatçık kalınlığındaki değişimin depolanan duyulur ısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varılabilir. FDM’de depolanan toplam enerji de kanatçık sayısı ile artış göstermekte olup 5 kanatçıktan

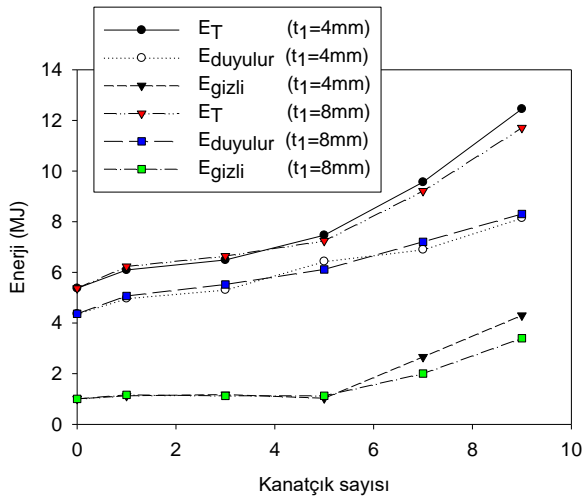
sonra kanatçık kalınlığı  $t_1=4\text{mm}$  iken bu artış, gizli ısının fazla olması nedeniyle daha fazladır. Kanatçık kalınlığının artması FDM'ye olan ısı geçişini artırıcı bir etkiye sahip olsa da, kanatçık kalınlığındaki artış ile beraber FDM kütlesi azaldığından bu beklenen bir sonuçtur. Şekil 10'da yükleme süresi sonunda FDM'de depolanabilecek maksimum ısılar yer almaktadır. FDM'de depo edilecek toplam enerji de FDM kütlesiyle orantılı olduğundan kanatçık kalınlığı ve sayısı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Şekil 11'de ise ısıl enerji deposu veriminin kanatçık sayısı ile değişimi görülmektedir. FDM'de yükleme süresi sonunda depolanabilecek maksimum enerji FDM'nin kapladığı hacim daha büyükken daha fazladır ( $t_1=4\text{mm}$  için). Şekil 9'dan FDM'de depolanan toplam enerjinin 5 kanatçığa kadar her iki kanatçık kalınlığında hemen hemen aynı olduğu görülebilir. Bu durumda Şekil 11'de ilk 5 kanatçığa kadar verimin  $t_1=8\text{mm}$  kanatçık kalınlığında daha fazla olması beklenen bir sonuçtur. Diğer yandan 5 kanatçıktan sonra FDM'de depolanan toplam enerjinin  $t_1=4\text{mm}$  kanatçık kalınlığı için daha fazla olması, FDM'de depo edilebilecek maksimum enerjinin daha fazla olmasına rağmen, verim üzerinde olumlu bir etki oluşturmakta ve böylece  $t_1=4\text{mm}$  kanatçık kalınlığında 5 kanatçıktan sonra daha yüksek verimler elde edilebilmektedir.



Şekil 10. Yükleme süresi sonunda FDM'de depolanabilecek maksimum ısılar



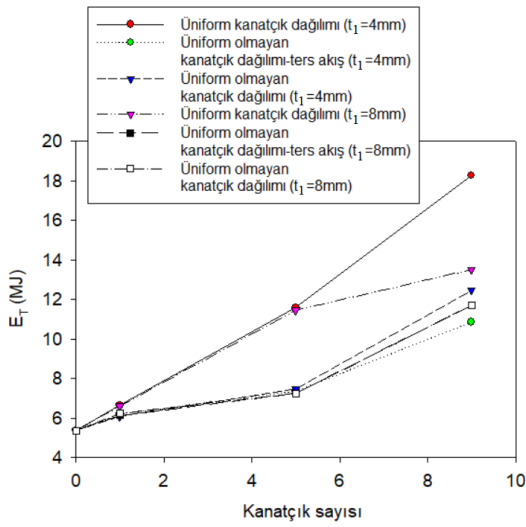
Şekil 11. Yükleme süresi sonunda ısıl enerji deposunun veriminin kanatçık sayısı ile değişimi



Şekil 9. Yükleme süresi sonunda FDM'de depolanan toplam, duyulur ve gizli ısılar

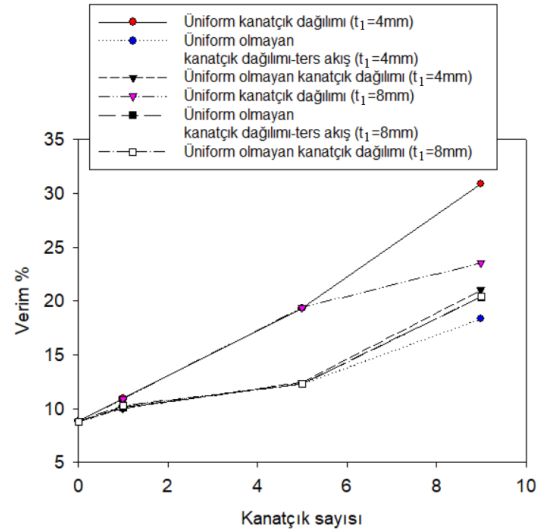
Bu çalışmada ayrıca üniform kanatçık dağılımı durumu ve kanatçıkların sıcak akışkanın çıkışında ve girişinde yoğunlaştığı (ters akış) durumları arasında bir karşılaştırma da yapılmıştır. Şekil 12-13'de farklı kanatçık kalınlıkları için 1, 5 ve 9 kanatçıklı düzenlemelere ait sonuçlar yer almaktadır. Şekil 12'den görülebileceği üzere her iki kanatçık kalınlığı için de FDM'de depolanan maksimum enerji üniform kanatçık durumu için elde edilmiştir. Bunun nedeni üniform kanatçık tasarımında kanatçıklardan FDM'ye daha homojen ısı geçişinin olmasıdır. Diğer yandan üniform kanatçık düzeninde  $t_1=4\text{mm}$  ve  $t_1=8\text{mm}$  kanatçık kalınlıkları için FDM'de depo edilen toplam enerji, düşük kanatçık sayılarında

birbirlerine çok yakın iken, kanatçık sayısı 9'a yükseldiğinde  $t_1=4\text{mm}$  kanatçık kalınlıklı sistemde depo edilen toplam enerji daha fazla olmaktadır. Fazla kanatçık sayılarında kalınlığı fazla olan kanatçıkların kapladığı hacim fazla olduğundan sistemde kullanılan FDM hacimi dolayısıyla da kütlesi azalmakta, bunun sonucu olarak da sistemde duyulur ve gizli olarak depolanan toplam enerji düşük olmaktadır. Üniorm olmayan kanatçık düzenlemelerinde FDM'de depo edilen toplam enerji değerleri her iki kanatçık kalınlığı için birbirlerine yakındır. Üniorm olmayan kanatçık düzenlemeleri arasında depo edilen maksimum toplam enerji değeri kanatçık sıklığının çıkışta fazla olduğu,  $t_1=4\text{mm}$  ve 9 kanatçık durumu için elde edilmiştir. Buradan üniorm olmayan kanatçık düzenlemeleri ve kanatçık sıklığının çıkışta fazla



Şekil 12. Yükleme süresi sonunda farklı tasarımlarda FDM'de depolanan toplam ısılar

olduğu durumlar için, FDM'de depolanan toplam enerjinin düşük kanatçık kalınlıklarında ve fazla kanatçık sayılarında daha fazla olacağı sonucu çıkarılabilir. Şekil 13'de farklı tasarımlarda ısı enerji deposunun verim değerinin kanatçık sayısı ile değişimi verilmiş ve bu eğrilerin FDM'de depo edilen toplam enerjiler ile benzer davranış gösterdiği görülmüştür. Şekil 12 ve 13'te  $t_1=8\text{mm}$  kanatçık kalınlığı için üniorm olmayan kanatçık dağılımlı durumlara ait eğriler üst üste çakışmıştır. Buradan  $t_1=8\text{mm}$  kanatçık kalınlığı için üniorm olmayan düzenlemelerde, kanatçıkların sıcak akışkanın girişinde veya çıkışında yoğunlaşmasının yükleme süresi sonunda FDM'de depolanan toplam ısı ve ısı enerji deposunun verimi üzerinde farklı bir etki yapmadığı sonucu çıkarılabilir.



Şekil 13. Yükleme süresi sonunda farklı tasarımlarda ısı enerji deposunun verimi

#### 4. Sonuçlar

Faz değiştiren malzeme içeren ısı enerji depolama sistemlerinde birim zamanda depolanan ısı enerji miktarını arttırmak için ısı iletkenliği yüksek kanatçıklar kullanılır. Bu çalışmada üniorm olmayan kanatçık düzenlemesinin ısı enerji deposunun performansı üzerindeki etkileri farklı kanatçık sayıları ve kalınlıkları için nümerik olarak incelenmiştir. Çalışma  $41-44^\circ\text{C}$  sıcaklık aralığında faz değiştiren (RT 44HC) malzeme için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar ısı performans için

birinci derecede etkili parametrenin kanatçık sayısı olduğunu ve yüksek kanatçık sayılarında daha yüksek verim elde edileceğini göstermiştir. Sıcak su çıkışında sık kanatçık kullanımı durumu için verim üniorm kanatçık durumuna göre daha düşüktür. Ayrıca kanatçık kalınlığının artırılması FDM'ye olan ısı geçişini arttırmakta ise de FDM'de depo edilen toplam enerji FDM kütlesi ile orantılı olduğundan, özellikle yüksek kanatçık sayılarında FDM'de depolanan toplam enerjiyi azaltıcı bir etki oluşturmaktadır. Bu çalışmada kanatçıklar arasındaki mesafe bir önceki mesafenin 1.5 katı olacak şekilde bir dizayn

yapılmıştır. Daha farklı homejen olmayan yapılar için de yapılacak bir çalışma bu çalışmanın sonuçlarını bir adım ileri götürme potansiyeline sahiptir.

### Simgeler

a: En dar kanatçık mesafesi [mm]  
c: Özgül ısı [J/kgK]  
D<sub>1</sub>: İç boru çapı [mm]  
D<sub>2</sub>: Depo çapı [mm]  
E: Enerji [MJ]  
k: Isı iletim katsayısı [W/mK]  
L=Faz değişim ısısı [J/kg]  
L<sub>1</sub>: İç boru uzunluğu [m]  
L<sub>2</sub>: Depo uzunluğu [m]  
m: Kütle [kg]  
 $\vec{n}$ : Birim normal vektör  
P: Basınç [Pa]  
 $\vec{q}$ : Isı akısı [W/m<sup>2</sup>]  
r, z: Radyal ve eksenel koordinatlar  
r<sub>p</sub>: Borunun iç yarıçapı D<sub>1</sub>/2 [m]  
S<sub>H</sub>: Kaynak terimi (W/m<sup>3</sup>)  
T<sub>0</sub>: Başlangıç sıcaklığı [°C]  
t<sub>0</sub>: Boru et kalınlığı [mm]

### 5. Kaynaklar

1. Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, **23**:251–283.
2. Ogoh, W., Groulx, D. (2012). Effects of the number and distribution of fins on the storage characteristics of a cylindrical latent heat energy storage system: a numerical study. *Heat Mass Transfer*, **48**:1825–1835.
3. Shatikian, V. (2004). Melting and solidification of a phase-change material with internal fins. M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Sciences, Ben-Gurion University of the Negev, Israil, 129s.
4. Augspurger, M., Udaykumar, H.S. (2017). Transient multi-day simulations of thermal storage and heat extraction for a finned solar thermal storage device. *Solar Energy*, **151**: 48-60.
5. Groulx, D., Ogoh, W. (2009). Solid-liquid phase change simulation applied to a cylindrical latent heat energy storage system. *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2009*, Boston.

t<sub>1</sub>: Kanatçık kalınlığı [mm]  
u<sub>0</sub>: Suyun giriş hızı [m/s]  
v<sub>r</sub>, v<sub>z</sub>: Radyal ve eksenel hız bileşenleri [m/s]  
T: Sıcaklık [°C]  
t: Zaman [s]

### Yunanca semboller

β: Erime oranı  
η: Verim  
∅: Viskoz yayılım [W/m<sup>3</sup>]  
μ: Dinamik viskozite [kg/ms]  
ρ: Yoğunluk [kg/m<sup>3</sup>]  
θ: Açısal koordinat

### Alt indisler

1,2: Sınır şartının uygulandığı bitişik yüzeyleri gösteren indisler  
FDM: Faz değıştiren malzeme  
i=kanatçık, boru duvarı  
in: Giriş  
l: Sıvı  
max: Maksimum  
s: Katı  
T: Toplam

6. Abdulateef, A.M., Mat, S., Abdulateef, J., Sopian, K., Al-Abidi, A.A. (2018). Geometric and design parameters of fins employed for enhancing thermal energy storage systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**: 1620-1635.
7. Paria, S., Sarhan, A.A.D., Goodarzi, M.S., Baradaran, S., Rahmanian, B., Yarmand, H., Alavi, M.A., Kazi, S.N., Metselaar, H.S.C. (2015). Indoor solar thermal energy saving time with phase change material in a horizontal shell and finned-tube heat exchanger. *The Scientific World Journal*, **2015**:1-7.
8. Murray, R.E., Groulx D. (2011). Modeling convection during melting of a phase change material. *Excerpt from the Proceedings of the 2011 COMSOL Conference*, Boston.
9. Rozenfeld, T., Kozak, Y., Hayat, R., Ziskind, G. (2015). Close-contact melting in a horizontal cylindrical enclosure with longitudinal plate fins: demonstration, modeling and application to thermal storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **86**: 465-477.
10. Arena, S., Casti, E., Gasia, J., Cabeza, L.F., Cau, G. (2017). Numerical simulation of a finned-tube LHTES system: influence of the mushy zone constant on the phase change behaviour. *Energy Procedia*, **126**: 517-524.

11. Kazemi, M., Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A., Bahrampoury, R. (2018). Improvement of longitudinal fins configuration in latent heat storage systems. *Renewable Energy*, **116**: 447-457.
12. Liu, C., Groulx, D. (2011). Numerical study of the effect of fins on the natural convection driven melting of phase change material. *Excerpt from the Proceedings of the 2011 COMSOL Conference*, Boston.
13. Rudonja, N.R., Komatina, M.S., Antonijević, D.L., Živković, G.S. (2016). Numerical simulation of latent heat storage with conductance enhancing fins. *Bulgarian Chemical Communications*, **48**: 199-205.
14. Naterer, G.F. (2003). *Heat Transfer in Single and Multiphase Systems*. CRC Press, United States of America, 603s.
15. [https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata\\_-RT44HC\\_EN\\_31052016.PDF](https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT44HC_EN_31052016.PDF)



## Sincap Kafesli Asenkron Generatörlü Rüzgar Türbin Sisteminin Özdeğer Hassasiyet ve Salınlı Kararlılık Analizi

**Burak YILDIRIM**

<sup>1</sup> Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler MYO, Bingöl  
byildirim@bingol.edu.tr

(Geliş/Received: 16.04.2018; Kabul/Accepted: 10.09.2018)

### Özet

Dünya genelinde rüzgar enerjisi seviyesinde meydana gelen artış nedeniyle rüzgar santrallerinin güç sistemleri kararlılığı üzerine etkileri yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Bu çalışmada, bir sincap kafesli asenkron generatöre (SKAG) sahip rüzgar santralının güç sistemi kararlılığı üzerine etkileri özdeğer analizleri yardımı ile incelenmiştir. Çalışmada ilk olarak özdeğer analizleri yardımı ile güç sistemlerinin salınım modları belirlenmiştir. Daha sonra, sistem kararlılığı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için makine ve kontrol parametrelerine göre özdeğer hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. SKAG rüzgar türbin sisteminin güç sistemine etkilerini incelemek amacıyla Kundur çift bölgeci güç sistemi üzerinde gerekli analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Analiz çalışmaları için SKAG rüzgar türbin sistemi ilk olarak çift bölgeci güç sisteminde bulunan bir senkron generatör ile yer değiştirilmiştir. Daha sonra senkron generatör ile yer değiştirmeden uygun bulunan bir baraya SKAG rüzgar türbin sistemi ilave edilerek analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. SKAG rüzgar türbin sistemi ilave edilen durumlar ile temel sistem durumu için karşılaştırmalı analiz işlemleri gerçekleştirilerek SKAG rüzgar türbin sisteminin güç sistemine etkileri incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sincap Kafesli Asenkron Generatör, Rüzgar Türbini, Salınlı Kararlılık, Özdeğer Hassasiyet Analizi

## Eigenvalue Sensitivity and Oscillatory Stability Analysis of Wind Turbine System with Squirrel cage induction generator

### Abstract

Due to the increase in wind energy level at worldwide, the impact on power systems stability of wind power plants are intensively investigated. In this study, the effects of wind farm with a squirrel cage induction generator (SCIG) on power system stability were investigated with the help of eigenvalue analysis. With the help of eigenvalue analysis in the study, the oscillatory modes of the power systems were first determined. Later, an eigenvalue sensitivity analysis was performed to evaluate the effects of machine and control parameters on system stability. In order to investigate the effects on the power system of SCIG wind turbine systems, analysis studies have been carried out on the Kundur's two-area power system. For analysis studies, the SCIG wind turbine system was first replaced by a synchronous generator located in the two-area power system. After that, synchronous generators were preserved and SCIG wind turbine system was added to suitable bus for analysis. For the systems with SCIG wind turbine and the basic system, comparative analysis procedures were carried out to examine the effects of the SCIG wind turbine system on the power system.

**Keywords:** Squirrel Cage Induction Generator, Wind Turbine, Oscillatory Stability, Eigenvalue Sensitive Analysis

### 1. Giriş

İçinde yaşadığımız modern toplumun enerji talebi her geçen gün artmaktadır. Enerji üretimi için kullanılan fosil kaynaklarımız geri dönüşü olmayan bir şekilde azalmaktadır. Buna ek olarak, bu yakıtları kullanan enerji santralleri dünyamıza ciddi zararlar vermektedir. Enerji devamlılığı ve mevcut elektrik dağıtım ve iletim

şebekelerinin altyapılarında ki yaşlanma gibi sorunlar mevcut güç şebekeleri için artan endişeler, elektrik enerjisi tedarikinin güvenliğini, güvenilirliğini ve kalitesini giderek daha fazla zorlamaktadır. Buna ek olarak, gelişmekte olan ülkelerdeki mevcut şebeke altyapıları artan yüksek maliyet ve mevcut şebeke verimliliğini artırma ihtiyacı gibi çeşitli sorunlar ile yüzleşmektedir. Bu alt yapıların karşılaştıkları sorunların üstesinden gelmek ve

bu gelişmeleri için önemli miktarda yatırım yapılması gerekirken, mevcut ihtiyaçları karşılamanın çok daha etkili bir yolu, yenilikçi çözümler, teknolojiler ve şebeke yapılarını birleştirmektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke bağlantıları, bu sorunlara çözüm sağlamanın en önemli yoludur [1-3]. Rüzgar enerjisi, yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilir ve özellikle son yirmi yılda rüzgar teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak dünya genelinde 2017 yılı sonu itibari ile kurulu gücü 539,581 MW değerine ulaşmıştır [4].

SKAG, tip 1 rüzgar generatörü olarak adlandırılan sabit hızlı bir rüzgar türbin üreticidir. SKAG rüzgar türbini, senkron hızın % 1–2 üzerinde çalışır ve SKAG, güç elektroniği kullanmadığı için, Çift Beslemeli İndüksiyon Generatörü ve Sabit Mıknatıslı Senkron Generatöre göre daha ucuzdur. SKAG rüzgar türbinleri, GE, Vestas ve Enercon gibi büyük rüzgar türbin üreticileri tarafından 1,5MW'a kadar olan değerlerde ticari olarak satılmaktadır [5].

Literatürde SKAG rüzgar türbinlerinin büyük bozucu kararlılık analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda SKAG rüzgar türbinlerine ait küçük sinyal kararlılık analiz çalışmaları da bulunmakta ayrıca farklı özelliklerdeki rüzgar türbin sistemlerinin de karşılaştırıldığı yayınlar literatürde bulunmaktadır [5-8]. Bu çalışmalarda SKAG rüzgar türbinlerinin detaylı osilasyonlu kararlılık analizinin yapıldığı ve mod şekilleri ve hassasiyet analizleri yardımı ile salımlı modları üzerine etkilerinin detaylı incelendiği bir yayın bulunmamaktadır.

Bu makalede SKAG rüzgar türbin sisteminin güç sistemi salımlı kararlılığı üzerine etkileri özdeğer analizi yöntemiyle detaylı olarak incelenmiştir. Bu amaçla ilk olarak bölüm 2’de salımlı kararlılık konusu hakkında açıklayıcı bilgiler verilmiş ve bölümün devamında özdeğer analizi yöntemi açıklanmıştır. Bölüm 3’de SKAG rüzgar türbinine ait model ve denklemler gösterilmiştir. Makalenin 4. bölümünde SKAG rüzgar türbininin güç sistemi üzerine etkileri analiz edilmiştir. Son olarak, Bölüm 5’de sonuçlar sunulmuştur.

## 2. Özdeğer ve Hassasiyet Analizi

Salımlı kararlılık problemi rotor açısı kararlılık problemi içerisinde incelenir [9]. Açık kararlılığı veya rotor açısı kararlılığı senkronizasyonda kalabilmek için birbirine bağlı senkron makinelerin yeteneği şeklinde tanımlanabilir. Bu kararlılık problemi güç sistemlerinin doğasında bulunan elektromekanik salımların incelenmesini içerir ve açı kararlılığı küçük bozucu açı kararlılığı ve transiyet açı kararlılığı olmak üzere iki ana alt kategoriye ayrılır [9-10]. Elektromekanik salımların 2 tipi vardır [10-11]:

(i) Lokal mod salımları: Güç sisteminin geriye kalan bölümlerine göre bir üretim istasyonundaki ünitelerin salımları ile ilişkili salımlardır. Salımlar güç sisteminin küçük bir kısmı veya tek istasyonda yerleştiği için lokal terimi kullanılır.

(ii) Bölgeler arası mod salımları: Güç sisteminin bölgeleri veya diğer kısımlarındaki makinalara karşı sistemin bir kısmındaki birçok makinenin salımları ile ilişkili salımlardır. Bu salımlara zayıf bağ ile bağlı olan eşleşmiş makinelerin 2 veya daha fazla grupları neden olur.

Küçük bozucu (aynı zamanda küçük sinyal veya salımlı olarak adlandırılır) rotor açısı kararlılığı generatörlerin küçük arızalardan sonra senkronizasyonlarını sürdürebilme kabiliyeti ile ilişkilidir. Burada “küçük” kelimesi anlam olarak, bozucular, sistem model denklemlerinin doğrusallaştırılması yoluyla olgunun incelenebileceği bir büyüklükte olduğu anlamını taşımaktadır [12].

Güç sisteminin küçük bozucu kararlılığı aşağıdaki denklemler ile verildiği gibi sıradan diferansiyel cebirsel denklem takımı ile gösterilebilir [13]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= g(x, u) \end{aligned} \quad (1)$$

Burada  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  durum değişkenleri vektörü,  $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$  sistem çıkış değişkenleri vektörü  $u = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$  sistem giriş değişkenleri vektörüdür.  $f = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T$  ve  $g = [g_1, g_2, \dots, g_n]^T$  ise durum ve çıkış değişkenlerini tanımlayan lineer olmayan fonksiyonlardır.



Küçük bir bozucuya maruz kaldığı zaman sistemin dinamik davranışını tanımlayan modal analiz, belirli bir işletme noktası etrafında denklem (1) lineerleştirilerek türetilir. Lineerleştirilen denklemler aşağıdaki denklemler tarafından verildiği gibi durum uzayın bir kümesi şeklinde gösterilebilir.

$$\begin{aligned}\Delta \dot{x} &= A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y &= C\Delta x + D\Delta u\end{aligned}\quad (2)$$

Burada  $\Delta$  ifadesi durum değişkenlerine karşılık gelen küçük değişimleri gösterir.  $\Delta x$  ve  $\Delta y$ , durum vektörü ve çıkış vektörü değişkenlerini gösterir.  $\Delta u$  ise giriş vektörü değişkenlerini gösterir. Durum, giriş ve çıkış matrisleri  $A$ ,  $B$  ve  $C$  olarak tanımlanır.  $D$  matrisi ise giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki bağlantıyı tanımlar.

Salınım şartlarına ve sistem dinamik yanıtına ilişkin önemli bilgiler durum matrisi  $A$ 'nın özdeğerlerinden türetilir. Sistemin özdeğerlerine bakılarak sistemin kararlılığı belirlenir. Eğer bütün özdeğerler negatif reel kısma sahip ise sistem kararlı, en az bir özdeğer pozitif reel kısma sahip ise sistem kararsızdır. Eğer özdeğerlerden bir tanesi imajiner eksen üzerinde olup diğer özdeğerler negatif reel kısma sahip ise sistem kritik kararlıdır ve sürekli salınımlara sahiptir.

Bir  $\lambda_i$  özdeğer ile ilgili modun zamana bağlı karakteristiği  $e^{\lambda_i t}$  ile verilir. Sistem yanıtı buna bağlı olarak özdeğer sadece reel kısımdan oluşuyor ise salınımsız mod ile kompleks özdeğerler ise salınımlı mod ile ilişkilidir. Özdeğerlerin reel bileşeni sönümlenmeyi verirken imajiner bileşeni salınımların frekansını verir. Bir negatif reel bileşen sönümlü salınımları verirken pozitif reel bileşen artan genlikli salınımları gösterir. Özdeğerlerin kompleks bir çifti için;

$$\begin{aligned}\lambda &= \sigma \pm j\omega \\ f &= \frac{\omega}{2\pi - \sigma} \\ \zeta &= \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}\end{aligned}\quad (3)$$

Burada  $f$  Hz cinsinden frekansı,  $\zeta$  ise sönüm oranını gösterir.

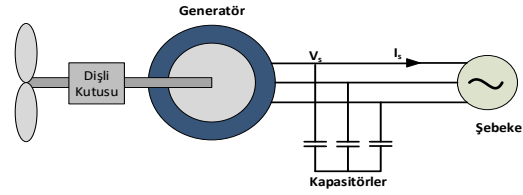
$$p_{ki} = \phi_{ki}\psi_{ik}\quad (4)$$

Burada  $\phi_{ki}$  ve  $\psi_{ik}$  sırasıyla sağ ve sol özvektör elemanlarını gösterir. Sağ ve sol özvektörlerin birleşimi olan katılım faktörü ( $p_{ki}$ ) durum değişkenleri ve modlar arasındaki

ilişkinin bir ölçüsünü verir. Bu,  $i$ . moddaki  $k$ . durum değişkeninin, göreceli katılımının bir ölçüsüdür. Katılım faktörü aslında, özdeğer  $\lambda_i$ 'nin, durum matrisi  $A$ 'nın köşegen elemanı  $a_{kk}$ 'ya hassasiyetine eşittir [14].

$$p_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}}\quad (5)$$

### 3. SKAG Rüzgar Türbini Modeli



Şekil 1. SKAG rüzgar türbini

Denklemler, şebeke referans açısına göre reel ( $r$ ) ve imajiner ( $m$ ) eksen cinsinden formüle edilir. Eşzamanlı olarak dönen bir referans çerçevesinde, şebeke ve stator makine gerilimleri arasındaki bağlantı aşağıdaki gibidir:

$$v_r = V \sin(-\theta)\quad (6)$$

$$v_m = V \cos(\theta)$$

ve güç emilimleri:

$$P = v_r i_r + v_m i_m\quad (7)$$

$$Q = v_m i_r - v_r i_m + b_c(v_r^2 + v_m^2)$$

Burada  $b_c$  başlatma aşamasında belirlenen sabit kondansatör iletkenliğidir. Stator direnci  $r_s$  arkasındaki gerilim açısından diferansiyel denklemler şunlardır:

$$e_r' - v_r = r_s i_r - x' i_m\quad (8)$$

$$e_m' - v_m = r_s i_m - x' i_r$$

Gerilim, akım ve durum değişkenleri arasındaki bağlantı şu şekildedir:

$$e_r' = \Omega_b(1 - \omega_m)e_m' - (e_r' - (x_0 - x')i_m)/T_0'\quad (9)$$

$$e_m' = -\Omega_b(1 - \omega_m)e_r' - (e_m' + (x_0 - x')i_r)/T_0'$$

Burada  $\omega_m$  rotor açısal hızıdır ve  $x_0$ ,  $x'$  ve  $T_0$  generatör parametrelerinden elde edilebilir:

$$x_0 = x_s + x_m\quad (10)$$

$$x' = x_s + \frac{x_R x_m}{x_R + x_m}$$

$$T_0' = \frac{x_R + x_m}{\Omega_b r_R}$$

Türbin ataleti  $H_t$ , rotor ataleti  $H_m$  ve shaft sıklığı  $K_s$ 'i dikkate alan mekanik diferansiyel denklemler aşağıdaki gibidir:

$$\dot{\omega}_t = (T_t - K_s \gamma)/(2H_t)\quad (11)$$

$$\dot{\omega}_m = (K_s \gamma - T_e)/(2H_m)$$

$$\dot{\gamma} = \Omega_b(\omega_t - \omega_m)$$

Burada  $\omega_t$  rüzgar türbini açısal hızıdır ve elektriksel tork  $T_e$  aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$T_e = e_r' i_r + e_m' i_m \quad (12)$$

Mekaniksel tork  $T_t$  de şu şekildedir:

$$T_t = \frac{P_\omega}{\omega_t} \quad (13)$$

Burada  $P_\omega$  rüzgardan çıkarılan mekaniksel güçtür. Ayrıca, rüzgarın ve rotor hızlarının bir fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi yaklaşılabılır:

$$P_\omega = \frac{\rho}{2} c_p(\lambda) A_r v_\omega^3 \quad (14)$$

Burada  $\rho$  hava yoğunluğudur,  $c_p$  performans katsayısı veya güç katsayısıdır,  $\lambda$  uç hız oranıdır ve son olarak  $A_r$  rotor tarafından süpürülen alandır. Hız ucu oranı  $\lambda$ , kanat ucu hızı  $v_{bt}$  ile rotor rüzgar kaynak yönü  $v_\omega$  arasındaki orandır:

$$\lambda = \frac{v_{bt}}{v_\omega} = \eta_{GB} \frac{2R\omega_t}{pv_\omega} \quad (15)$$

Burada  $\eta_{GB}$  dişli kutusu oranı,  $p$  asenkron generatörün kutuplarının sayısı ve  $R$  de rotor yarıçapıdır. Son olarak  $c_p(\lambda)$  eğrisi yaklaşık olarak aşağıdaki gibidir:

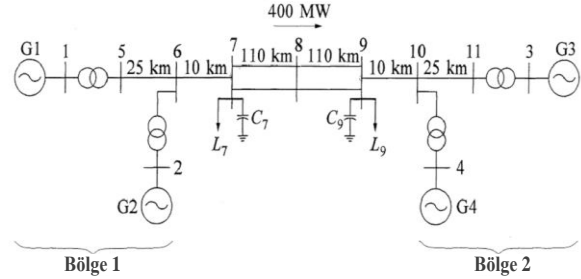
$$c_p = 0.44 \left( \frac{125}{\lambda_i} - 6.94 \right) e^{-\frac{16.5}{\lambda_i}} \quad \text{ile} \quad (16)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} + 0.02}$$

Kule gölge etkilerini simule etmek için,  $T_t$ ' ye bir periyodik tork titreşimi ilave edilir ve bu

frekans, rotor hızı  $\omega_t$ 'ye dişli kutusu oranı  $\eta_{GB}$ 'ye ve kanatların sayısı  $n_b$ 'ye bağlıdır [15].

$$\tilde{T}_t = T_t \left( 1 + 0.025 \sin \left( \eta_{GB} \frac{\Omega_b \omega_t}{n_b} t \right) \right) \quad (17)$$



Şekil 2. Kundur 2 bölgeli güç sistemi [14].

#### 4. Analiz Çalışmaları

SKAG rüzgar türbinin güç sistemine etkileri Şekil 2'de gösterilen Kundur'un 2 bölgeli güç sistemi üzerinde incelenmiştir. Güç sistemi üzerine SKAG etkilerini göstermek için aşağıdaki üç durum için özdeğer ve hassasiyet analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

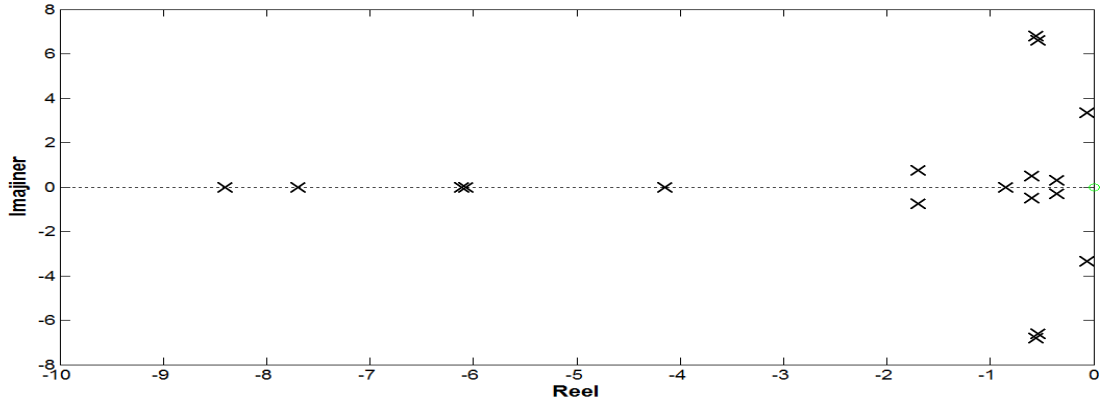
**Durum 1:** Temel durum

**Durum 2:** 1 nolu baradaki senkron generatör aynı güçte SKAG rüzgar türbini ile yer değiştirmiştir.

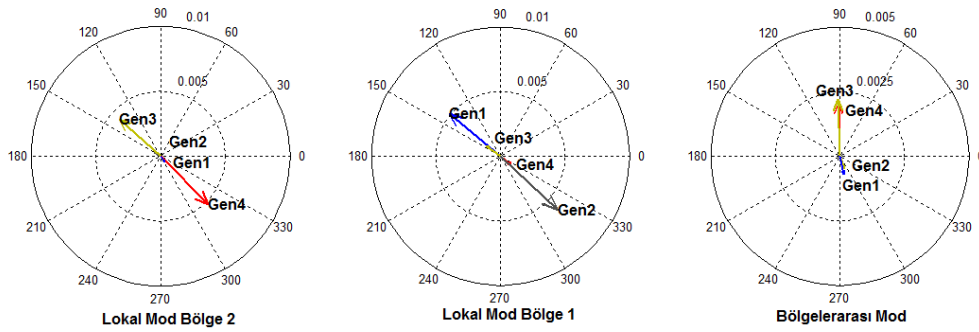
**Durum 3:** Temel durum sistem için 5 nolu baraya 450 MVA güce sahip SKAG rüzgar türbini ilave edilmiştir.

Tablo 1. Durum 1 için özdeğerler.

EM modu	Özdeğer	Frekans	Sönüm oranı	Katılım faktörleri				Mod çeşidi
				Gen1 ( $\Delta Syn1$ $\omega Syn1$ )	Gen2 ( $\Delta Syn2$ $\omega Syn2$ )	Gen3 ( $\Delta Syn3$ $\omega Syn3$ )	Gen4 ( $\Delta Syn4$ $\omega Syn4$ )	
1	$-0.5548 + 6.7889j$	1.0841	0.081	0.0048	0.0078	0.2166	0.2942	Lokal mod-Bölge 2
2	$-0.5548 - 6.7889j$	1.0841	0.081	0.0048	0.0078	0.2166	0.2942	Lokal mod-Bölge 2
3	$-0.5440 + 6.5979j$	1.0536	0.082	0.2236	0.2862	0.0100	0.0039	Lokal mod-Bölge 1
4	$-0.5440 - 6.5979j$	1.0536	0.082	0.2236	0.2862	0.0100	0.0039	Lokal mod-Bölge 1
5	$-0.0671 + 3.34j$	0.5316	0.02	0.0777	0.0381	0.2274	0.1708	Bölgeler arası mod
6	$-0.0671 - 3.34j$	0.5316	0.02	0.0777	0.0381	0.2274	0.1708	Bölgeler arası mod



Şekil 3. Durum 1 için özdeğerler



Şekil 4. Durum 1 için bölgeler arası ve lokal modların generatör hızlarının mod şekilleri

Şekil 3 ve Tablo 1’de durum 1 için özdeğer analizi sonuçları verilmiştir. Ayrıca durum 1 için gerçekleştirilen hassasiyet analiz çalışmalarına ait sonuçlarda Tablo 1’de verilmiştir.  $\Delta Syn$  ve  $\omega Syn$  generatöre ait rotor açıları ve rotor hızlarını göstermektedir. Son olarak durum 1’e ait mod şekilleri de Şekil 4’de gösterilmiştir.

Şekil 3 incelendiği zaman durum 1 için güç sistemine ait özdeğerlerin tümü imajiner eksenin sol tarafında bulunduğu için güç sistemi kararlıdır. Durum 1 için gerçekleştirilen hassasiyet analiz çalışmaları yardımıyla bu güç sisteminde 2 adet lokal mod salınımı 1 adet de bölgeler arası salınım olduğu görülmektedir.

Lokal mod ve bölgelerarası salınım modları, senkron generatörlerin rotor hızı durum değişkenlerinin modlara katılım oranları hesaplanarak belirlenir. Lokal modların hangi bölgelere ait olduğu bölgelerde bulunan senkron generatörlerin o moda yaptıkları katkılara bakılarak karar verilir. Lokal mod bölge 1 için bölge 1 de bulunan senkron generatör 1 ve 2’nin katkılarının en fazla olduğu ve diğer bölgedeki generatörlerin katkılarının en az olduğu mod olarak belirlenir. Lokal mod bölge 2 içinde aynı

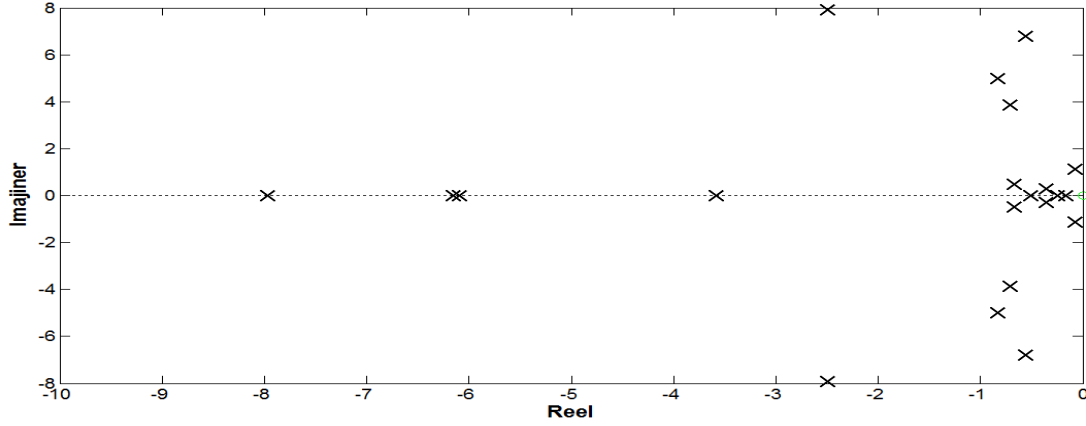
durum geçerlidir. Bölgelerarası salınım modunda ise bu moda bütün generatörlerin katkı yaptığı mod olarak belirlenir. Bu modların salınım frekanslarının literatüre uygun olarak bölgelerarası salınımlar için 1 HZ’den düşük lokal modlar için ise 1 ile 2 Hz arasında olduğu görülmüştür.

Durum 1 için Mod şekilleri (senkron generatörlerin rotor hızları ile ilişkili özvektör bileşenleri) Şekil 4’de gösterilmiştir. Mod şekilleri lokal ve bölgeler arası modların belirlenmesinde ve incelenmesinde büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Mod şekillerinden de görüleceği üzere 0.53 Hz frekansa sahip olan mod bölgelerarası moddur ve bölge 1’in generatörleri Gen1 ve Gen2 bölge 2’nin generatörleri Gen 3 ve Gen 4 ile karşılıklı salınımlar göstermektedir. Aynı durum 1.05 Hz frekansa sahip lokal mod bölge 1 için de görülebilir. Bu şekilde de bölge içindeki Gen1 ve Gen2 bir birlerine karşı salınım göstermektedir. 1.08 Hz frekansa sahip mod içinde bölge 2’de bulunan Gen3 ve Gen4 birbirlerine karşı salınımlar göstermektedir. Lokal modlarda diğer

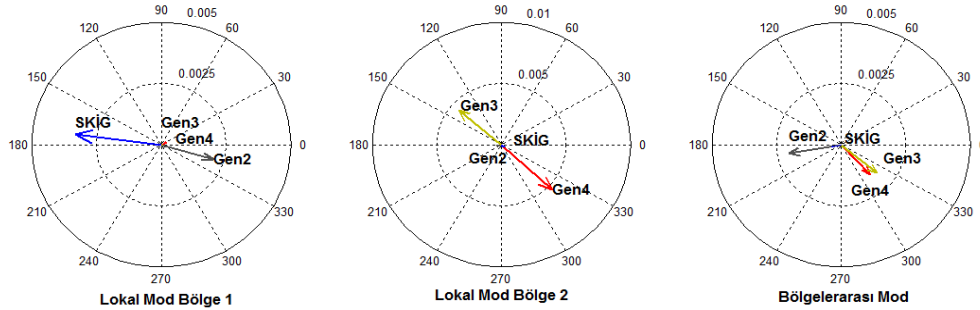
bölgede bulunan generatörlerin salınım boyutları çok küçüktür.

**Tablo 2.** Durum 2 için özdeğerler.

EM modu	Özdeğer	Frekans	Sönüm oranı	Katılım faktörleri				Mod çeşidi
				SKAG $\omega_{skig}$	Gen2 $\Delta_{Syn2}$ $\omega_{Syn2}$	Gen3 $\Delta_{Syn3}$ $\omega_{Syn3}$	Gen4 $\Delta_{Syn4}$ $\omega_{Syn4}$	
1	$-2.4899 + 7.929$	1.3227	0.299	0.3471	0.1631	0.0002	0.0024	Lokal mod-Bölge 1
2	$-2.4899 - 7.929$	1.3227	0.299	0.3471	0.1631	0.0002	0.0024	Lokal mod-Bölge 1
3	$-0.5579 + 6.7889$	1.0841	0.082	0.0004	0.0017	0.2231	0.2995	Lokal mod-Bölge 2
4	$-0.5579 - 6.7889$	1.0841	0.082	0.0004	0.0017	0.2231	0.2995	Lokal mod-Bölge 2
5	$-0.7072 + 3.8486$	0.6227	0.18	0.0164	0.2347	0.1628	0.1107	Bölgeler arası mod
6	$-0.7072 - 3.8486$	0.6227	0.18	0.0164	0.2347	0.1628	0.1107	Bölgeler arası mod



**Şekil 5.** Durum 2 için özdeğerler



**Şekil 6.** Durum 2 için bölgeler arası ve lokal modların generatör hızlarının mod şekilleri

Şekil 5 ve Tablo 2’de durum 2 için özdeğer analizi sonuçları verilmiştir. Ayrıca durum 2 için gerçekleştirilen hassasiyet analiz çalışmalarına ait sonuçlarda Tablo 2’de verilmiştir. Son olarak durum 2’de ait mod şekilleri de Şekil 6’da gösterilmiştir.

Şekil 5 incelendiği zaman durum 2 için güç sistemine ait özdeğerlerin tümü imajiner eksenin sol tarafında bulunduğu için güç sistemi kararlıdır. Durum 2 için gerçekleştirilen hassasiyet analiz çalışmaları yardımıyla bu güç sisteminde 2 adet lokal mod salınımı 1 adet de bölgeler arası salınım olduğu görülmektedir.

Durum 2 için bara 1’de bulunan senkron generatör aynı güce sahip bir SKAG rüzgar türbini ile yer değiştirmiştir. Tablo 2 incelendiği zaman durum 1’e göre lokal mod bölge 1 de SKAG rüzgar türbinin ilavesi önemli oranda sistemin sönüm oranını artırmış ve buna bağlı olarak güç sistemi salınım kararlılığı açısından olumlu bir etki sağlamıştır. Lokal mod bölge 2 de ise sistem üzerine önemli bir etki sağlamamıştır. Bölgelerarası mod üzerine etkileri incelendiği zaman lokal mod bölge 1 üzerine yaptığı etkiye benzer şekilde güç sisteminin bu moduna sönümleyici etki sağlayarak sönümlü

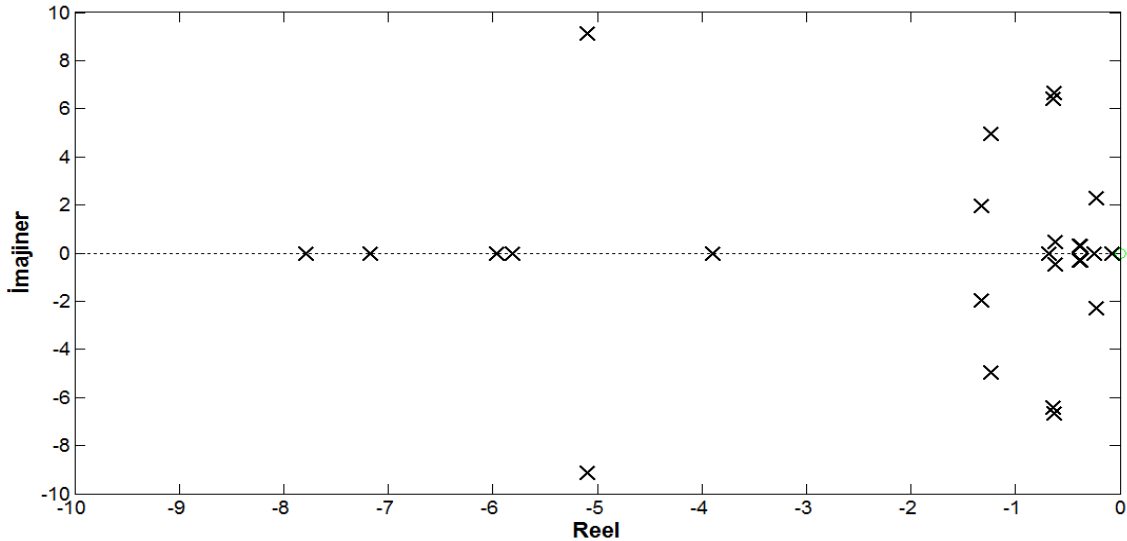
kararlılık açısından sistemin iyileşmesini sağlamıştır. Lokal modların belirlenmesinde kullanılan yöntem durum 1 de açıklanmıştır. Durum 2 içinde belirlenen salınımların literatüre uygun olarak bölgelerarası salınımlar için 1HZ'den düşük lokal modlar için ise 1 ile 2 Hz arasında olduğu görülmüştür.

SKAG'ler senkron generatörlere göre yapısal olarak daha iyi sönümlenmiştir ve sönümleme sağlamak için senkron generatörlere göre güç sistemine daha az bağımlıdır. Bu nedenle nadiren güç sistemi salınımlarına neden olurlar [16]. Durum 2 için elde edilen sonuçlarda bu durumu göstermektedir.

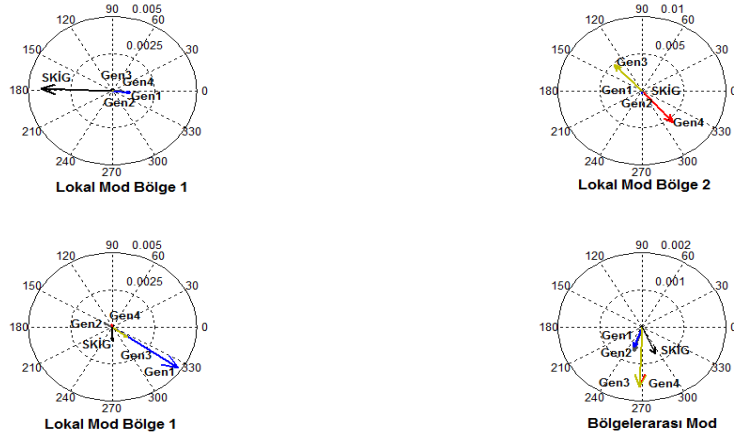
Durum 2 için mod şekilleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Mod şekillerinden de görüleceği üzere 0.62 Hz frekansa sahip olan mod bölgelerarası moddur ve bölge 1'in generatörleri SKAG ve Gen2 bölge 2'nin generatörleri Gen 3 ve Gen 4 ile karşılıklı salınımlar göstermektedir. Aynı durum 1.32 Hz frekansa sahip lokal mod bölge 1 içinde görülebilir. Bu şekilde de bölge içindeki SKAG ve Gen2 bir birlerine karşı salınım göstermektedir. 1.08 Hz frekansa sahip mod içinde bölge 2'de bulunan Gen3 ve Gen4 birbirlerine karşı salınımlar göstermektedir.

**Tablo 3.** Durum 3 için özdeğerler.

EM modu	Özdeğer	Frekans	Sönüm oranı	Katılım faktörleri					Mod çeşidi
				SKAG $\omega_{skig}$	Gen1 $\Delta_{Syn1}$ $\omega_{Syn1}$	Gen2 $\Delta_{Syn2}$ $\omega_{Syn2}$	Gen3 $\Delta_{Syn3}$ $\omega_{Syn3}$	Gen4 $\Delta_{Syn4}$ $\omega_{Syn4}$	
1	$-5.1006 + 9.1284$	1.6642	0.487	0.5457	0.0758	0.0258	0.00013	0.00036	Lokal mod-Bölge 1
2	$-5.1006 - 9.1284$	1.6642	0.487	0.5457	0.0758	0.0258	0.00013	0.00036	Lokal mod-Bölge 1
3	$-0.6285 + 6.6794$	1.0678	0.093	0.00001	0.0028	0.0013	0.2352	0.2903	Lokal mod-Bölge 2
4	$-0.6285 - 6.6794$	1.0678	0.093	0.00001	0.0028	0.0013	0.2352	0.2903	Lokal mod-Bölge 2
5	$-0.6352 + 6.4231$	1.0273	0.098	0.0049	0.2205	0.3046	0.0056	0.00062	Lokal mod-Bölge 1
6	$-0.6352 - 6.4231$	1.0273	0.098	0.0049	0.2205	0.3046	0.0056	0.00062	Lokal mod-Bölge 1
7	$-0.2314 + 2.2818$	0.6227	0.1008	0.099	0.1710	0.1205	0.5408	0.4857	Bölgeler arası mod
8	$-0.2314 - 2.2818$	0.6227	0.1008	0.099	0.1710	0.1205	0.5408	0.4857	Bölgeler arası mod



**Şekil 7.** Durum 3 için özdeğerler



**Şekil 8.** Durum 3 için bölgeler arası ve lokal modların generatör hızlarının mod şekilleri

Şekil 7 ve Tablo 3’de durum 3 için özdeğer analizi sonuçları verilmiştir. Ayrıca durum 3 için gerçekleştirilen hassasiyet analiz çalışmalarına ait sonuçlar da Tablo 3’de verilmiştir. Son olarak durum 3’e ait mod şekilleri de şekil 8’de gösterilmiştir.

Şekil 7 incelendiği zaman durum 3 için güç sistemine ait özdeğerlerin tümü imajiner eksenin sol tarafında bulunduğu için güç sistemi kararlıdır. Durum 3 için gerçekleştirilen hassasiyet analiz çalışmaları yardımıyla bu güç sisteminde durum 1 ve 2’den farklı olarak 3 adet lokal mod salınımı 1 adet de bölgeler arası salınım olduğu görülmektedir.

Durum 3 için bara 5’e 450 MW güce sahip bir SKAG rüzgar türbini yerleştirilmiştir. Tablo 3 incelendiği zaman durum 1’e göre SKAG rüzgar türbini ilavesi ile bölge 1 için yüksek bir sönümle frekansına sahip yeni bir lokal mod oluştuğu görülmektedir. Ayrıca durum 1 ile kıyaslandığı zaman bölge 1’e ait diğer lokal mod için ise SKAG rüzgar türbinin ilavesi sistemin sönüm oranını çok küçük bir miktarda arttırmış ve buna bağlı olarak güç sistemi salınım kararlılığı açısından olumlu bir etki sağlamıştır. Lokal mod bölge 2 de ise yine sistem üzerinde küçük oranda sönüm miktarını artırarak olumlu yönde katkı sağlamıştır. Bölgelerarası mod üzerine etkileri incelendiği zaman güç sisteminin bu moduna önemli bir ölçüde sönümleyici etki sağlayarak sönümlü kararlılık açısından sistemin iyileşmesini sağlamıştır. Lokal modların belirlenmesinde kullanılan yöntem durum 1 de açıklanmıştır. Durum 3 içinde belirlenen salınımların literatüre uygun olarak bölgelerarası

salınımlar için 1 Hz’den düşük lokal modlar için ise 1 ile 2 Hz arasında olduğu görülmüştür.

Güç sistemine rüzgar gücünün ilave edilmesi ile mevcut senkron generatörler güç talebini karşılamak için daha az katkıda bulunurlar. Ancak sistem topolojisi değişmeden kaldığı için şebekenin empedansı ile orantılı olarak senkron generatörler daha küçük hale gelecektir. Bu da birçok durumda senkron generatörler arasında herhangi bir salınımın sönümlenmesini iyileştiren ortak kuplajı güçlendirecektir [16]. Durum 3 için elde edilen sonuçlar da bu durumu göstermektedir.

Durum 3 için mod şekilleri Şekil 8’de gösterilmiştir. Mod şekillerinden de görüleceği üzere 0.62 Hz frekansa sahip olan mod bölgelerarası moddur ve bölge 1’in generatörleri Gen1, Gen2 ve SKAG bölge 2’nin generatörleri Gen 3 ve Gen 4 ile karşılıklı salınımlar göstermektedir. Aynı durum 1.02 Hz ve 1.66 Hz frekansa sahip lokal mod bölge 1 şekilleri içinde görülebilir. Bu şekiller de 1.66 Hz için bölge içindeki SKAG ile Gen1 ve Gen2 bir birlerine karşı 1.02 Hz için ise Gen1 ile Gen2 ve SKAG bir birine karşı salınım göstermektedir. 1.06 Hz frekansa sahip mod içinde bölge 2’de bulunan Gen3 ve Gen4 bir birlerine karşı salınımlar göstermektedir.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, SKAG rüzgar türbininin güç sistemi kararlılığı üzerine etkileri özdeğer analizleri yardımı ile incelenmiştir. Analiz çalışmaları Kundur’un iki bölgeli güç sistemi

modeli üzerinde gerçekleştirilmiş ve temel duruma ait özdeğer sonuçları rüzgar türbininin bulunduğu durumlara ait özdeğerler ile kıyaslanarak rüzgar türbinin etkileri gösterilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiği zaman ilk olarak güç sisteminde mevcut bulunan bir senkron generatör SKAG rüzgar türbini ile yer değiştirdiği zaman bu generatörün bulunduğu bölge ye ait lokal modlar ve bölgelerarası mod üzerinde sönümlenme etkisi yaparak güç sistemini salınımlı kararlılık açısından iyileştirici etkiler sağlamış diğer bölgeye ait lokal mod üzerinde ise belirgin bir etki göstermemiştir. Bu sonuç SKAG'lerin senkron generatörlere göre yapısal olarak daha iyi sönümlenmeye sahip olmaları ve sönümlenme sağlamak için senkron generatörlere göre güç sistemine daha az bağımlı olmalarındandır.

## 6. Kaynaklar

1. Yıldırım, B. and Gencoglu M. T. (2017). Impact of Microgrid on Power System Voltage Stability. *2nd International Conference on Advances in Engineering and Technology (RTET-2017)*, Penang (Malaysia) 158–162.
2. Sharkh, S. M., Abu-Sara, M. A., Orfanoudakis, G. I., and Hussain B. (2014). Power electronic converters for microgrids. John Wiley & Sons.
3. Hatziargyriou, N. (2014). Microgrids Architectures and Control. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
4. GLOBAL WIND STATISTICS 2017. <http://gwec.net/global-figures/graphs/>. Erişim Tarihi:10.204.2018.
5. Kong, S. Y., Bansal, R. C., and Dong, Z. Y. (2012). Comparative small-signal stability analyses of PMSG-, DFIG- and SCIG-based wind farms. *Int. J. Ambient Energy*, **33**: 87–97.
6. Chandra, D. R. *et al.* (2014). Impact of SCIG, DFIG wind power plant on IEEE 14 bus system with small signal stability assessment. *2014 18th Natl. Power Syst. Conf. NPSC 2014*.
7. He, P., Wen, F., Ledwich, G., Xue, Y., and Huang, J. (2015). Investigation of the Effects of Various Types of Wind Turbine Generators on Power-System Stability. *J. Energy Eng.* **141**:1–10.
8. Lopez, Y. U. and Navarro, J.A.D. (2008). Small signal stability analysis of wind turbines with squirrel cage induction generators. *2008 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am.*
9. Kundur, P. *et al.* (2004). Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. *IEEE Trans. Power Syst.* **19**:1387–1401,.
10. Mondal, D., Chakrabarti, A. and Sengupta, A. (2014). Power System Small Signal Stability Analysis and Control. Elsevier.
11. Sauer, P. W. and Pai, M. A. (1998). Power System Dynamics and Stability.: Pearson Education Pte. Ltd. Singapore.
12. Gomez-Exposito, A., Coneho, A.J. and Canizares, C. (2009) Electric Energy Systems Analysis and Operation. CRC Pres Taylor@Francis Group.
13. Krismanto, A. U., Mithulanathan, N, and Kamwa, I. (2018). Oscillatory stability assessment of microgrid in autonomous operation with uncertainties. *IET Renew. Power Gener.* **12**: 494–504.
14. Kundur, P. (1994). Power system stability and control. New York: McGraw-hill.
15. Milano, F. (2008). PSAT Power System Analysis Toolbox.
16. Ackermann, T. (2005) .Wind power in power systems. Wiley Online Library.





## Siğil Tedavisinde Sınıflandırma Algoritmalarının Performans Analizi

Erkan TANYILIDIZI, Murat KARABATAK, Gökçe YILDIRIM, Zeynep ÖZPOLAT  
Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği, 23119 Elazığ, Türkiye  
gokce.yildirim1426@gmail.com

(Geliş/Received: 15.04.2018; Kabul/Accepted: 10.09.2018)

### Özet

Siğiller, deri üzerinde HPV virüsünün sebep olduğu bir rahatsızlıktır. Belli bir süre sonra kendiliğinden geçmesine rağmen, görüntüsünün kötü olması ve günlük yaşamı olumsuz etkilemesinden dolayı hastalar genellikle tedavi olmayı tercih etmektedirler. Siğil tedavisinde belirli bir yöntem olmadığından, uzmanlar tedavi yöntemi seçiminde siğil türü ve hastanın fizyolojik özelliklerini dikkate almaktadırlar. Bu çalışmada, birçok türü bulunan siğillerden, plantar ve common siğiller için tedavi yöntemlerinin seçimi üzerinde durulmaktadır. Bu siğil türlerinin tedavisinde, İmmünoterapi ve Kriyoterapi yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Kriyoterapi, uygulaması kolay ve etkili bir tedavi yöntemi olup, İmmünoterapi ise son zamanlarda yaygınlaşan ve siğil tedavisinde yüksek oranda başarı elde edilen bir yöntemdir. Bu makalede amaç, tedavi seçiminde uzmanlara yardımcı olmak ve hastalara uygun tedavi yönteminin belirlenmesi için, veri madenciliği algoritmalarını uygun bir şekilde kullanmaktır. Kriyoterapi ve İmmünoterapi veri setlerinde yapılan sınıflandırma algoritmalarının başarımları karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Siğiller, Kriyoterapi, İmmünoterapi, Veri Madenciliği

## Performance Analysis of Classification Algorithms in Wart Treatment

### Abstract

The warts are a disturbance that is caused by HPV viruses on the skin. Patients often prefer to be treated, although the view is self-inflicted after a certain period of time, because the appearance is bad and adversely affects daily life. As there is no specific method in the treatment of warts, specialists take into consideration the type of wart and the physiological characteristics of the patient in choosing a treatment method. In this study, selection of the treatment methods for plantar and common warts which have numerous types are warts. Immunotherapy and cryotherapy are commonly used methods in the treatment of these warts. Cryotherapy is an easy and effective treatment method and Immunotherapy is a method that has become widespread recently and achieved high success in wart treatment. The purpose of this article is to help experts in treatment selection and to use data mining algorithms appropriately to determine the appropriate treatment method for the disease. The performances of classification algorithms in cryotherapy and immunotherapy data sets were compared.

**Keywords:** Warts, Cryotherapy, Immunotherapy, Data Mining

### 1. Giriş

Bilim dünyasında meydana gelen bir gelişme, doğrudan ya da dolaylı olarak farklı birçok disiplini etkilemektedir. Gün geçtikçe büyüyen ve karmaşıklaşan veri yığınlarından, uzmanların işine yarayacak olan bilginin elde edilmesi için veri madenciliği yöntemleri geliştirilmektedir. Veri madenciliği, disiplinler arası bir alan olduğu için buradaki gelişmeler, diğer alanlara da etki etmektedir. Bunlardan birisi de tıp alanıdır. Hastalardan elde edilen verilere,

uzmanların görüşleri eklenerek veri tabanları oluşturulur. Bu veri tabanlarına, gerekli işlem basamakları uygulanarak bu alandaki gelişmelere katkı sağlanabilir.

Siğiller, çoğunlukla, el ve ayaklarda meydana gelen ve insan popülasyonu virüsünün (HPV) sebep olduğu bir rahatsızlıktır [1]. Deri ve mukoza zarlarında meydana gelmektedir. Her insanda ortaya çıkabilecek bu hastalığın farklı türleri mevcuttur. Siğillerin tedavisinde; topikal yakıcı asit, Kriyoterapi, elektrokoter, ameliyatla çıkarılması, lazerle çıkarılması, bleomisin

intralezyonel enjeksiyonu, *Candida albicans* (C. albicans), saflaştırılmış protein türevleri (PPD) ve kabakulak, kızamık, kızamıkçık (MMR) antijenleri gibi çeşitli tedavi yöntemleri kullanılır [2]. Bu kadar çeşitli tedavi türü olmasına rağmen her insana tüm siğil türleri için uygulanacak ortak bir tedavi yöntemi bulunmamaktadır.

Siğil tedavisi yöntemleri arasında, plantar ve common siğillerinin tedavisi için sıklıkla Kriyoterapi ve İmmünoterapi yöntemleri tercih edilmektedir [3]. Kriyoterapi tedavisi, Mısırlılar ve Hipokrat zamanından beri yaygın kullanılan basit ve etkili bir yöntemdir. Buz tedavisi olarak da bilinen bu yöntemde, kullanılan gaz, bir probun içerisinden geçirilerek probun ucu soğutulur. Soğuk prob, yara üzerine uygulanarak yaranın içinde ve dışında bulunan saf su dondurulur ve oradaki hücrelerin ölmesi sağlanır. 3 veya 4 seanstan sonra, yaralarda %50-70 arasında bir iyileşme görülmektedir [4]. Ancak, bu yöntem uygulanırken çeşitli yan etkiler oluşabilmektedir. Aynı zamanda tedavi süreci uzun sürmekte ve ağrılı olabilmektedir.

Uzmanlar, Kriyoterapinin bazı olumsuz yönlerini giderebilecek alternatif bir tedavi arayışlarına girmişlerdir. İmmünoterapi ise yeni bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. İmmünoterapi, bağışıklığın temelden etkilendiği durumlarda, bağışıklık sistemini tedavi etmeyi amaçlamaktadır [5]. Siğil tedavisi için uygulanan İmmünoterapi yönteminde, çeşitli hastalıkların antijenleri siğil üzerine sürülerek bu bölgenin tedavi edilmesi amaçlanır.

Bu iki yöntemi karşılaştıran, literatürdeki bazı çalışmalar incelenmiştir. Khozeimeh ve ark. siğil tedavisinin seçiminde, ilk kez veri madenciliği algoritmalarını kullanmışlardır. Tedavi seçiminde önemli olan özellikler, her iki tedavi türü için de tespit edilmiştir. Bu özellikler arasındaki ilişkinin tespit edilebilmesi için apriori algoritması kullanılmıştır. Apriori algoritması uygulandığında, destek ve güven değerleri dikkate alınarak İmmünoterapi grubu için 3, Kriyoterapi grubu için 7 anlamlı kural oluşturulmuştur. Apriori algoritması ile elde edilen kurallar, uzmanların belirlediği üyelik fonksiyonlarına göre bulanık kurallara dönüştürülmüştür. Daha sonra bu kurallara ANFİS ile optimizasyon işlemi uygulanarak elde edilen sonuçlar iyileştirilmiştir [6].

Gerçekleştirilen bir başka çalışmada, dirençli siğillerin tedavisinde, kabakulak ve *Candida* deri testi antijenlerinin etkili olduğu gösterilmiştir. Çocuklarda görülen dirençli siğillerin tedavisi için, bir veya daha fazla siğili olan 47 pediatrik hastaya kabakulak veya *Candida* deri testi antijeni enjekte edilmiştir. Tedavi edilen 22 hastanın (%47) tam olarak iyileştiği gözlemlenmiştir [7].

Özellikle common siğil tipine sahip hastalarda, İmmünoterapi MMR antijenlerinin etkinliği üzerinde de çalışmalar yapılmaktadır. [8, 9]. Nofal ve ark. tarafından gerçekleştirilen bu çalışmanın amacı, common siğile sahip olan hastaların tedavisinde intralezyonel kabakulak, kızamık ve kızamıkçık (MMR) aşısının etkinliğini ve güvenilirliğini değerlendirmektir. Çalışmada, bir ya da daha fazla dirençli veya dirençsiz common siğile sahip 135 hasta kullanılmaktadır. Bu hastalar rastgele iki gruba ayrılmaktadır. 85 kişiden oluşan birinci gruba MMR aşuları uygulanmıştır. 50 kişilik ikinci gruba ise kontrol grubu olarak tuz uygulanmıştır. Tedavi sonucunda iki grup arasında anlamlı bir fark tespit edilmektedir. MMR ile tedavi edilen grupta, dirençli ve çoklu siğile sahip hastalar üzerinde sırasıyla %80 ve %84.6 başarı elde edilmiştir. MMR aşısı ile intra-immüner immünoterapi, common siğiller, özellikle de çoklu siğili olan hastalar için ümit verici, etkili ve güvenli bir tedavi olduğu sonucuna varılmaktadır [8].

Bir başka çalışmada, en az bir tane siğili bulunan 115 hasta üzerinde kabakulak ve *Candida* antijenlerinin etkisi test edilmiştir. Kriyoterapi ile tedavi edilemeyen siğiller için kabakulak veya *Candida* antijeni siğile enjekte edilerek tedavi edilebildiği gözlemlenmektedir [10].

*Molluscum contagiosum* ve siğilleri olan 217 çocuk hasta üzerinde, *Candida* antijeni ile immünoterapi tedavisi uygulanmıştır. Yapılan 1 yıllık gözlemler sonucunda, *Candida* antijenin siğil tedavisinde etkili ve güvenli bir yöntem olduğu düşünülmektedir [11].

Bir diğer çalışmada amaç, viral siğillerin tedavisinde plaseboya kıyasla intradermal ve intralezyonel *Candida* antijeninin etkinliğini belirlemektir. 30 kişiden oluşan iki grup üzerinde yapılan deneysel çalışmaların sonuçları gözlemlenmiştir [12].

Daha önce de belirtildiği gibi, siğil tedavisi yöntemleri hastanın özellikleri ve siğil türüne

göre değişmektedir. Hangi tür tedavinin uygun olduğunu tespit etmek, hem zaman hem de maliyet açısından büyük kayıplara sebep olmaktadır. Uzmanlara bu konuda yardımcı olmak amacıyla, veri madenciliği yöntemlerinden yararlanılabilir.

Bu çalışma ile, hasta özelliklerine göre Kriyoterapi ve İmmünoterapi yöntemlerinden hangisinin daha uygun olduğunu tahmin etmek amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, İmmünoterapi ve Kriyoterapi veri setlerine sınıflandırma algoritmaları uygulanmıştır. Başarımı yüksek olan algoritmalar tedavi sürecine yardımcı olmak amacıyla uzmanların hizmetine sunulmaktadır.

## 2. Materyal ve Metot

Veri madenciliği son zamanlarda gelişen ve üzerinde hala çalışılan bir alandır. Veri madenciliğinin asıl amacı, veri yığınlarını kullanarak temel modellerden birini oluşturmaktır. Bu model üzerinden, veriler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmak ve veri yığımında olmayan farklı bir verinin yorumlanmasını sağlamaktır. Veri madenciliği 3 temel modelden oluşmaktadır [13].

- Sınıflandırma ve Regresyon
- Kümeleme
- Birliktelik Kuralıdır.

### 2.1. Sınıflandırma

Bir veri seti üzerinde tanımlanan sınıflara verilerin uygun bir şekilde dağıtılması işlemine sınıflandırma denir. Sınıflandırma algoritmaları ise, eğitim verilerini kullanarak sınıfların özelliklerini öğrenmede ve test verisi olarak gelen bilginin hangi sınıfa ait olduğunu tahmin etmede kullanılan algoritmalar [14].

Sınıflandırma algortimalarından lieratürde en yaygın kullanılanlar Naive Bayes, Yapay Sinir Ağları (YSA), Destek Vektör Makinaları (SVM), K – En Yakın Komşu (IBK), KStar, C4.5 (J48) ve Random Forest algoritmalarıdır. Bu algoritmalar;

- **J48 algoritması**; temel olarak C4.5 algoritmalarına dayanır. C4.5 algoritmasının Weka'ya uyarlanmış hali J48 algoritmasıdır.

Bu algoritmanın amacı karar ağacını optimize etmektir. [15-19].

- **Random Forest**; birçok karar ağacı kullanarak sınıflandırma başarımını yükseltmeyi amaçlayan bir algoritmadır. Tek tek elde edilen ağaçlar bütünleştirilerek karar ormanları elde edilir [20].
- **Naive Bayes**; temel olarak Bayes teoremine dayanmaktadır. Olasılıksal hesaplamalarla verilerin kategorilerini belirleyen algoritmadır. Naive Bayes algoritmasında önemli olan nokta bilginin nasıl sınıflandırıldığıdır [21,22].
- **YSA**; insan beyninden esinlenerek ortaya çıkmış bir algoritmadır. Esas olarak, biyolojik sinir ağlarını taklit eder. Veri setiyle yapılan eğitim sonucunda öğrendiği sistemle, ağa farklı girişler uygulandığında nasıl tepkiler vereceğine karar verir. Bu sistem algoritma ile bulunabilir, elle yapılandırılabilir ya da her ikisini de kullanabilir. [23 -25].
- **SVM**; örüntü tanıma ve sınıflandırma problemlerinin çözümü için uygulanan bir algoritmadır. Çok terimli kernel kullanarak destek vektör sınıflandırıcıyı eğitir. Bütün nitelikleri önceden tanımlanmış olan verilerle normalize eder [26]
- **IBK**; Çapraz doğrulama kullanarak, bilinmeyen bir örneğin dahil olduğu sınıfı belirlemek için, bu örneğe en yakın olan k örnekleme bulan algoritmadır. Mesafeleri ağırlıklandırabilme özelliğine de sahiptir [27, 28].
- **K-Star**; benzerlik fonksiyonlarıyla belirlenebilen örnek tabanlı bir algoritmadır. K-star algoritması, eğitim sınıfına ait olan örneklere dayanarak aynı verilerle test sınıfını da oluşturur. Mesafe hesaplamasını, entropi tabanlı yaparak diğer örnek tabanlı öğrenenlerden ayrılır [29].

### 2.2. Karışıklık matrisi

Karışıklık Matrisi, sınıflandırma işlemi sonucunda elde edilen değerlerin sunumu için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Sınıflandırma başarımının net bir şekilde değerlendirilebilmesi için doğruluk, duyarlılık ve özgünlük değerlerinin hesaplanması gerekmektedir [15]. Bu değerler karmaşıklık

matrisinden elde edilmektedir. Tablo 1’de karmaşıklık matrisinin yapısı verilmektedir.

**Tablo 1.** Karışıklık matrisi

		Öngörülen Sınıf	
		EVET	HAYIR
Gerçek Sınıf	EVET	TP	FN
	HAYIR	FP	TN

Tablo 1’de satırlar gerçek sınıfı, sütunlar ise tahmin edilen sınıf değerlerini göstermektedir. Bu değerler aşağıda verilen formüllerde yerine yazılarak hesaplanır ve oluşturulan modelin geçerliliği incelenir.

Yöntemin geçerliliğinin belirlenmesinde kullanılan ölçütlerden biri doğruluk oranıdır. Test veri setindeki tüm veriler içerisinde, ne kadarının doğru sınıfta tahmin edildiğini ifade etmektedir.

$$Doğruluk = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

Bir diğer ölçüt ise duyarlılıktır. Duyarlılık toplam pozitif örnek sayısı içerisindeki doğru sınıflandırılmış pozitif değerleri göstermektedir.

$$Duyarlılık = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

Özgünlük ise gerçekten yanlış olanlar arasında, yanlış olarak tahmin edilenlerin sayısını vermektedir.

$$Özgünlük = \frac{TN}{TN + FP} \quad (3)$$

Veri setinin, eğitim ve test verisi olarak hangi oranlarda bölüneceğinin belirlenmesi, sınıflandırma başarımını etkilemektedir. Varolan veri seti, belirli bir oranda bölünerek veya veri setinde olmayan veriler ile ayrıca test edilerek doğruluk belirlenebilir.

### 3. Uygulama

Bu çalışmanın temel amacı, siğil tedavisi uygulanırken hangi yöntemin hasta üzerinde etkili olduğunu tahmin etmektir. Gerçekleştirilen çalışmada, Kriyoterapi ve İmmünoterapi veri setlerine Weka’da temel sınıflandırma

algoritmaları uygulanmaktadır. Her bir sınıflandırma için, test seçeneklerinden 10–kat çapraz doğrulama metodu seçilmiştir. Tedavi yöntemlerinin tahmininde başarıyı en yüksek olan algoritmalar kullanılmıştır.

### 3.1. Veri seti

Bu çalışmada, Khozeimeh ve ark. tarafından oluşturulan veri setleri kullanılmıştır. Bu veri setleri, Ocak 2013’ten Şubat 2015’e kadar Meşhed’deki Ghaem Hastanesinin dermatoloji kliniğine siğil tedavisi için gelen 180 hastadan toplanan veriler ile oluşturulmuştur [6]. Veri setleri, dermatoloji kliniğine başvuran plantar ve common siğilli hastaların bilgilerinden oluşmaktadır. Bunlar en sık görülen siğil tiplerinden iki tanesidir. Hastaneye ilk gelen hasta birinci gruba, ikinci gelen hasta ikinci gruba gönderilmiştir. Her grupta toplam 90 kişi olana kadar hastalar rastgele bir şekilde gruplandırılmıştır. Birinci gruptaki hastalara Candida antijeni yöntemiyle İmmünoterapi tedavisi uygulanmıştır. İkinci grup ise, sıvı nitrojen kullanılarak Kriyoterapi ile tedavi edilmiştir.

Sınıflandırma işlemine geçmeden önce, hastaların hangi özelliklerinin tedavi seçiminde daha etkili olduğunu tespit etmek amacıyla, özellik seçimi uygulanmaktadır. Özellik seçimi için bilgi kazancı metodunu kullanmışlardır. Bilgi kazancı metodunda, elde edilen özelliğin kazanç değeri ne kadar yüksek ise sınıflandırma görevinde de o kadar iyi bir aday özelliktir [30]. Bilgi kazancının hesaplanabilmesi için öncelikle entropi değeri hesaplanmalıdır. Daha sonra bu entropi değeri kullanılarak kazanç ölçütleri hesaplanır [31]. Özellikler, kazancı en yüksek olandan başlanarak sıralanır.

Bilgi kazancı metodu ile, İmmünoterapi tedavisi uygulanan 90 hasta ve bu hastalara ait 8 özellik, Kriyoterapi tedavisi için ise 90 hasta ve 7 özellik bulunmuştur. Seçilen özellikler, alanında uzman hekimlerin görüşleri de dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu özellikler Tablo 2 ve 3’te etkili olma sıralarına göre verilmektedir ve bu özelliklerin her biri için belirlenen sınırlar gösterilmektedir.

**Tablo 2.** Kriyoterapi veri setlerinde bulunan özellikler ve değer aralıkları

KRİYOTERAPİ	DEĞER ARALIKLARI
Tedavi öncesi geçen süre (ay)	0 - 12
Yaş	15 - 67
Siğil tipi	1 – Common (54), 2 – Plantar (9), 3 – Her İkiside (27)
Siğilin yüzey alanı (mm <sup>2</sup> )	4 - 750
Cinsiyet	47 Erkek 43 Kadın
Siğil sayısı	1 – 12

**Tablo 3.** Kriyoterapi veri setlerinde bulunan özellikler ve değer aralıkları

İMMÜNÖTERAPİ	DEĞER ARALIKLARI
Tedavi öncesi geçen süre (ay)	0 – 12
Başlangıç sertleşme çapı testi(mm)	5 – 70
Yaş	15 – 56
Siğil tipi	1 – Common (47), 2 – Plantar (22), 3 – Her İkiside (21)
Siğilin yüzey alanı (mm <sup>2</sup> )	6 – 900
Cinsiyet	41 Erkek 49 Kadın
Siğil sayısı	1 – 19

Her iki veri seti için de, sınıflandırma sonucu “tedavi yanıtı” sınıfı altında, olumlu ise 1, olumsuz ise 0 şeklindedir. Kriyoterapi veri seti için tedaviye olumlu yanıt verenlerin sayısı 48, olumsuz yanıt verenlerin sayısı 42’dir. İmmünoterapi veri seti için ise 71 olumlu, 19 olumsuz yanıt bulunmaktadır.

### 3.2. Deneysel sonuçlar

Siğil tedavisinde, her hasta için uygulanabilecek belirli bir tedavi yöntemi bulunmamaktadır. Tedavi yönteminin belirlenebilmesi için, hastanın çeşitli fizyolojik özellikleri bilinmelidir. Bu özellikler incelendikten sonra, hangi yöntemin etkili olabileceği uzmanlar tarafından belirlenmektedir. Kriyoterapi ve İmmünoterapi uygulanması için gerekli hasta özellikleri, birbirine oldukça yakındır. Çalışmanın amacı, bu algoritmalar yardımıyla hasta özelliklerini analiz ederek, hangi tedavi yönteminin daha uygun olduğunu belirlemektir. Bu amaç doğrultusunda, veri madenciliği yöntemlerinden yararlanılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmada, literatürde bulunan farklı sınıflandırma algoritmaları veri setlerine uygulanmış ve performansları incelenmiştir. Hangi algoritmanın daha anlamlı sonuç verdiğini belirlemek için doğruluk, duyarlılık ve özgünlük değerleri hesaplanmıştır. Tablo 4’de, Kriyoterapi veri seti için uygulanan sınıflandırma algoritmalarının başarımları kriterleri verilmektedir

**Tablo 4.** Kriyoterapi veri seti için sınıflandırma başarımları

Kriyoterapi	Doğruluk	Duyarlılık	Özgünlük
Naive Bayes	83,33	0,76	0,90
Yapay Sinir Ağları (YSA)	87,77	0,91	0,85
Destek Vektör Makinesi (SVM)	87,77	0,91	0,85
K – En Yakın Komşu (IBK)	90,00	0,91	0,90
KStar	96,66	0,98	0,96
C 4.5 (j48)	93,33	0,98	0,90
RandomForest	93,33	0,98	0,90
Bulanık Tabanlı Kural-Apriori [6]	80,00	0,87	0,77

Tablo 4’den elde edilen sonuçlar incelendiğinde, K – Star algoritması, Kriyoterapi için seçim yapılırken en iyi sonuç veren algoritmadır. Naive Bayes algoritması ise bu veri

seti için diğer algoritmalar ile kıyaslandığında daha kötü bir sonuç verdiği görülmektedir. Aynı veri seti üzerinde [6]’de gerçekleştirilen bulanık mantık tabanlı kuralların başarımları ölçütleri de

tabloda verilmektedir. K-Star algoritmasının, sınıflandırmada daha başarılı olduğu görülmektedir. K-Star algoritmasına ait karışıklık matrisi Tablo 5’de verilmektedir.

**Tablo 5.** K-Star algoritmasına ait karışıklık matrisi

		Öngörülen Sınıf	
		Negatif	Pozitif
Gerçek Sınıf	Negatif=0	41	1
	Pozitif=1	2	46

Tablo 6’de ise, İmmünoterapi veri seti için elde edilen başarımların sonuçları gösterilmektedir. Her bir sınıflandırma algoritması için doğruluk, duyarlılık ve özgünlük değerleri hesaplanmıştır.

İmmünoterapi veri seti incelendiğinde, tedaviye yanıt veren ve vermeyen hastalar arasında homojen bir dağılım olmadığı gözlemlenmiştir. Bu veri setinde, Kriyoterapi veri setine göre bütün kriterlerin başarımlarında düşüş olduğu görülmektedir.

**Tablo 6.** İmmünoterapi veri seti için sınıflandırma başarımları

İmmünoterapi	Doğruluk	Duyarlılık	Özgünlük
Naive Bayes	76,66	0,21	0,92
Yapay Sinir Ağları (YSA)	81,11	0,42	0,92
Destek Vektör Makinesi (SVM)	78,88	0,00	1,00
K – En Yakın Komşu (IBK)	70,00	0,21	0,83
KStar	74,44	0,32	0,86
C 4.5 (j48)	82,22	0,47	0,92
RandomForest	85,55	0,47	0,96
Bulanık Tabanlı Kural-Apiori [6]	83,33	0,87	0,71

Tablo 6 incelendiğinde, Destek Vektör Makinesi kullanılarak yapılan sınıflandırma sonuçlarında, duyarlılık değeri sıfır olarak hesaplandığından, İmmünoterapi veri setini Destek Vektör Makineleri ile sınıflandırmanın uygun olmadığı görülmektedir. Bu veri seti için en başarılı sınıflandırma, Random Forest algoritmasına aittir.

Bulanık tabanlı kurallara göre Random Forest algoritmasının doğruluk ve özgünlük oranları daha yüksek olmasına rağmen, bulanık tabanlı algoritmanın duyarlılığının daha yüksek olduğu görülmektedir. Tablo 7’de, Random Forest algoritmasına ait karışıklık matrisi gösterilmektedir.

**Tablo 7.** Random Forest algoritmasına ait karışıklık matrisi

		Öngörülen Sınıf	
		Negatif	Pozitif
Gerçek Sınıf	Negatif=0	9	10
	Pozitif=1	3	68

#### 4. Sonuç

Siğiller, virüslerin sebep olduğu bir hastalık türüdür. Günümüzde tüm siğil türleri için uygulanabilecek bir yöntem bulunmamaktadır. Tedavi yönteminin tercihi, veri madenciliği algoritmalarından faydalanılmıştır.

Bu çalışmada, veri madenciliği algoritmaları yardımıyla hastanın özellikleri analiz edilerek, hangi tedavi yönteminin daha uygun olduğunu belirlenmektedir. Her iki tedavinin uygulanması için gerekli olan, hastanın fizyolojik özellikleri belirlenmektedir. Kullanılan tedavi yöntemleri için, sınıflandırma algoritmalarının sonuçları analiz edilmiştir. En yüksek başarımla sahip olan K-Star ve Random Forest algoritmaları üzerinden sonuçlar değerlendirilmiştir.

Sınıflandırmada başarılı olan algoritmalar incelendiğinde hangi tedavinin daha uygun olduğuna karar verilebilmektedir. Yapılan çalışmada, kriyoterapi ile tedavi edilen hastalarda, uygulanan tedavinin uygun olup olmamasına yönelik en iyi tahmin başarımlarını %96,66 ile K-

Star algoritması elde edilmiştir. İmmünoterapiyle tedavinin, başarılı olup olmayacağını ise en iyi ortaya koyan algoritma %85,55 başarımla Random Forest algoritmasıdır. Deneysel çalışmalar göstermektedir ki bu algoritmalar, siğil tedavisinde hangi yöntemin tercih edilebileceği konusunda uzmanlara yardımcı olabilir.

## 5. Kaynaklar

1. Rowson, K.E., Mahy, B.W. (1967). Human papova (wart) virus. *Bacteriol Rev* 1967; **31**: 110–131.
2. Gibbs, S., Altman, D. G., Harvey, I., Sterling, J., & Stark, R. (2002). Local treatments for cutaneous warts: systematic review, *Bmj*, **325**: 1-8.
3. Khozeimeh, F., Azad, F.J., Oskouei, Y.M., Jafari, M., Tehranian, S., Alizadehsani, R., Layegh, P., (2017). Intralesional immunotherapy compared to cryotherapy in the treatment of warts, *International Journal of Dermatology* **56**: 474–478.
4. Godley, M. J., Bradbeer, C. S., Gellan, M., & Thin, R. N. (1987). Cryotherapy compared with trichloroacetic acid in treating genital warts, *Sexually Transmitted Infections*, **63(6)**: 390-392.
5. [https://www.tavsiyedyorum.com/makale\\_1171\\_0.htm](https://www.tavsiyedyorum.com/makale_1171_0.htm), Erişim Tarihi: 08.08.2018.
6. Khozeimeh, F., Alizadehsani, R., Roshanzamir, M., Khosravi, A., Layegh, P., Nahavandi, S., (2017). An expert system for selecting wart treatment method, *Computers in Biology and Medicine* **81**: 167–175
7. Clifton, M.M., Johnson, S.M., Roberson, P.K., Kincannon, J., Horn, T.D., (2003). İmmünoterapi için recalcitrant warts in children using intralesional mumps or candida antigens, *Pediatr. Dermatol.* **20**: 268–271.
8. Nofal, A., Nofal, E., (2010). Intralesional immunotherapy of common warts: successful treatment with mumps, measles and rubella vaccine, *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* **24**: 1166–1170.
9. Horn, T.D., Johnson, S.M., Helm, R.M., Roberson, P.K., (2005). Intralesional immunotherapy of warts with mumps, Candida, and Trichophyton skin test antigens: a singleblinded, randomized, and controlled trial, *Arch. Dermatol.* **141**: 589–594.
10. Johnson, S. M., Roberson, P. K., & Horn, T. D. (2001). Intralesional injection of mumps or Candida skin test antigens: a novel immunotherapy for warts. *Archives of dermatology*, **137(4)**:451-455.
11. Maronn, M., Salm, C., Lyon, V., Galbraith, S., (2008). One-year experience with candida antigen immunotherapy for warts and molluscum, *Pediatr. Dermatol.* **25**: 189–192.
12. Khurshid, K., Pal, S.S., (2009). Role of candida antigen in treatment of viral warts: a placebocontrolled study, *J. Pak. Assoc. Dermatol.* **19**: 146–150.
13. Özkan, Y., (2008), Veri Madenciliği Yöntemleri, Papatya Yayıncılık, İstanbul
14. <http://bilgisayarkavramlari.sadievrenseker.com/2013/03/31/siniflandirma-classification/>, Erişim Tarihi: 07.08.2018.
15. Coşkun, C., & Baykal, A. (2011). Veri Madenciliğinde Sınıflandırma Algoritmalarının Bir Örnek Üzerinde Karşılaştırılması. XIII. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, 51-58.
16. Patil, T. R., & Sherekar, S. S. (2013). Performance analysis of Naive Bayes and J48 classification algorithm for data classification. *International journal of computer science and applications*, **6(2)**: 256-261.
17. Wei, C. P., & Chiu, I. T. (2002). Turning telecommunications call details to churn prediction: a data mining approach. *Expert systems with applications*, **23(2)**: 103-112.
18. Quinlan, J. R. (1986). Induction of decision trees. *Machine learning*, **1(1)**: 81-106.
19. <https://medium.com/@Emreyz/y%C3%B6ntemler-4-1-c4-5-algoritmas%C4%B1-7382de92584e>, Erişim Tarihi: 30.07.2018.
20. <https://www.slideshare.net/SezerFidanc/random-forest-algoritmas>, Erişim Tarihi: 01.08.2018.
21. Bayes Ağları (Bayes Network), <http://bilgisayarkavramlari.sadievrenseker.com/2008/12/21/bayes-aglari-bayesian-network/>, Erişim Tarihi: 03.08.2018.
22. <https://kodedu.com/2014/05/naive-bayes-siniflandirma-algoritmasi/>, Erişim Tarihi: 25.07.2018.
23. Data Mining Software in Java, [www.cs.waikato.ac.nz/~ml/weka/](http://www.cs.waikato.ac.nz/~ml/weka/), Erişim Tarihi: 24.07.2018.
24. Kıyan, T., Yıldırım, T., (2003). Eğitici Ve Eğitici Nöral Algoritmalar Kullanarak Göğüs Kanseri Teşhisi, Elektrik -Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, İstanbul, Türkiye, 453-456.
25. <http://www.derinogrenme.com/2017/03/04/yapay-sinir-aglari/>, Erişim Tarihi: 29.07.2018.
26. Ardıl, E., (2009). Esnek Hesaplama Yaklaşımı İle Yazılım Hata Kestirimi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 86s.
27. Aha, D. W., Kibler, D., & Albert, M. K. (1991). Instance-based learning algorithms. *Machine learning*, **6(1)**: 37-66.

28. Özekes, S . (2003). Veri Madenciliği Modelleri ve Uygulama Alanları, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, **2 (3)**: 65-82.
29. Cleary, J. G., & Trigg, L. E. (1995). K\*: An instance-based learner using an entropic distance measure. In Machine Learning Proceedings , 108-114.
30. Alizadehsani, R., Habibi, J., Hosseini, M.J., Mashayekhi, H., Boghrati, R., Ghandeharioun, A., Bahadorian, B., Sani, Z.A., (2013). A data mining approach for diagnosis of coronary artery disease, Comput, Methods Prog. Biomed, **111**: 52–61.
31. <https://www.ce.yildiz.edu.tr/personal/.../Veri+Madenciliği-SınıflamaKumeleme.ppt>, Erişim Tarihi: 30.07.2018.



## 802.15.4 Tabanlı Sensör Düğümü Tasarımı ve Geliştirilen Kablosuz Sensör Ağ Uygulama Ortamı: FıratZigBee

Güngör YILDIRIM, Yetkin TATAR

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Elazığ  
ytatar@firat.edu.tr

(Geliş/Received:12.05.2018; Kabul/Accepted:11.07.2018)

### Özet

Kablosuz Sensör ağlarının (KSA/WSN) temel bileşenleri olan kablosuz sensör ağ düğümleri (KSAD), işlemci ve hafıza devresi, radyo modülleri, güç üniteleri, sensörler/aktuatörler ve dönüştürücü devrelerinden oluşmaktadır. Mevcut KSAD 'lerin maliyetlerinin yüksek olması bir yana amaca yönelik tasarımlarda ek donanımlara/bağlantılara ihtiyaç duymaları veya bunun tam tersi olarak uygulamaların ihtiyaç duymadığı gereksiz özelliklere sahip olabilmeleri, dezavantajlardır. Bu makalede, özellikle deneysel amaçlı ve çok sayıda sensör düğüm gerektiren KSA ağ uygulamalarında kullanılmak üzere amaca özel programlanabilen, kurulumu ve işletmesi kolay, mevcut diğer ZigBee KSAD'ler ile kıyaslanabilen özelliklerde bir sensör düğümün (FNode) tasarlanıp gerçekleştirme süreci sunulmuştur. Buna ek olarak FNode'lardan oluşturulacak KSA yapılarını kontrol edebilen, sensör düğümlerden toplanan verileri ön işlemlerle optimize ederek veri tabanlarına kaydedebilen bir kontrol ve gözlemlene yazılımının (FMonitör) geliştirme detayları paylaşılmıştır. FıratZigBee isimli bu KSA sistemin gerekli test ve denemeleri yapılarak hem pratik uygulamalar için hem de ilgili eğitim kurumlarındaki KSA uygulamaları için bir deneysel platform olarak kolaylıkla kullanılabilir olduğu gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kablosuz duyurga ağları, WSN, WSN düğüm

## Design of an 802.15.4 Based WSN Node and a Wireless Sensor Network Application Platform: FıratZigBee

### Abstract

Wireless sensor networks nodes, which are the fundamental components of wireless sensor networks (WSNs), consist of several units such as microcontroller, memory, radio, power supply, sensors/actuators, and their drivers. Besides their costs, today's WSN nodes may have several disadvantages, such as being goal-oriented devices requiring specific application components and having some unused hardware pieces that increase the cost. In this paper, for WSN systems requiring a large number of WSN nodes, the design of a WSN node, which is easy to use and comparable with other ZigBee nodes, which can be programmed towards a goal-oriented, is introduced. These nodes are called FNodes. In addition to this, the details of the WSN monitoring and optimization software, called FMonitor, which is developed to processes and optimizes the collected data before storing in databases, is also shared. As a result, by doing the necessary tests and experiments, it has been shown that the WSN system, named FıratZigBee, can be used as a testbed platform for both practical applications and educational goals.

**Keywords:** Wireless sensor networks, WSN, WSN nodes

### 1. Giriş

Gömülü sistem teknolojilerindeki gelişmeler ile birlikte pek çok farklı disiplinde kullanılan teknolojiler de değişim göstermeye başlamıştır. Devre boyutlarının fiziksel olarak küçülmesi, yazılımsal ve teknik kapasitelerinin artması ile birlikte daha verimli üretim/kontrol sistemlerinin geliştirilme süreçleri de hızlanmıştır. Kablosuz

sensör ağları da (KSA/WSN) bu teknolojik gelişmelerden nasibini almış olup günümüz yaygın teknolojileri arasına girmiştir. Özellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Siber Fiziksel Sistemlerin (CPS) yaygınlaşmaya başlamasıyla KSA sistemlerde kullanılan teknolojilerde bu yönde değişmeye başlamıştır. KSA 'lar normal ağlardan farklı olarak, enerji kısıtları, dağıtık yapıları ve sınırlı işlem kapasiteleri gibi birçok

kısıtlayıcı özelliğe sahiptir. KSA düğümlerinde aranan özelliklerden birisi de yapılacak işe uygun minimum donanımsal ve yazılımsal konfigürasyonlardır. Bu sayede hem düğümün işlem hızı artmış olur hem de maliyeti ve enerji sarfiyatı azalmış olur. KSA 'lar üzerine uygulama geliştirici kurumların yapacakları uygulamaya uygun, işlem kapasitesi yüksek, çok sayıda sensör/aktuatörü denetleyebilen, yazılımsal olarak kolay programlanabilen ucuz maliyetli çok sayıda KSA düğümüne ihtiyaç duyduğu da açıktır.

Bu makalede kullanıcının kendi uygulamaları için rahatça programlayıp kullanabileceği, uygun maliyetli ve esnek bir KSA düğüm yapısının geliştirilmesi, bu düğümler ile oluşturulmuş KSA ve bu ağın yönetilmesini/gözlenmesini sağlayan bir ağ yönetim yazılımının gerçekleştirilme ve deneme süreci açıklanmıştır. Geliştirilen düğümler "FNode", oluşturulan KSA yapısı "FıratZigBee" ve yazılan ağ yönetim modülü ise "FMonitor" olarak isimlendirilmiştir. Makalenin ilerleyen bölümlerinde KSA'ların katmanlı mimari yapıları ve mevcut KSA düğümleri kısaca açıklanmış sonrasında ise gerçekleştirilen düğüm yapısının donanımsal-yazılımsal kısımları ve FMonitor ağ yönetim yazılımının geliştirilme süreci detaylı bir şekilde verilmiştir. FNode'ların belirli kriterlere göre test edilip sonuçlarının tartışıldığı bölümden sonra ise FNode'lar ile gerçekleştirilen fiziksel KSA yapısının FMonitör yazılımı ile denetlenme sürecindeki uygulama sonuçları tartışılmıştır.

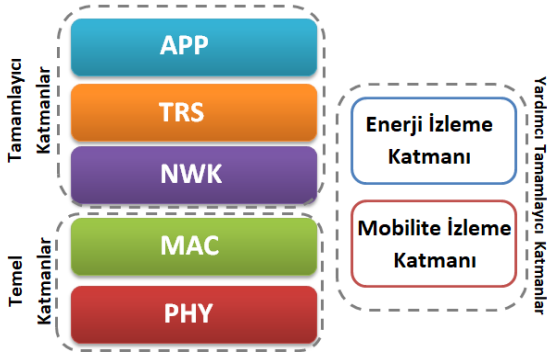
## 2. KSA Katmanlı Mimarisi ve Düğüm Teknolojileri

Yaklaşık yirmi yıllık gelişim ve olgunlaşma sürecinde pek çok KSA sistem teknolojisi ortaya çıkmıştır [1]. Doğal olarak bu da heterojen bir ürün yelpazesini ortaya çıkartmıştır. Bu alandaki heterojenlik, temelde düğüm ve ağ bazlı olmak üzere farklı gelişimler göstermiştir [2]. Düğüm açısından farklı katmansal ve donanımsal özellikler, KSA sistemlerin karakteristiğini doğrudan etkilemektedir. KSA 'lar belirli katmansal bir protokol yığıtı üzerine çalışmaktadırlar [3]. Şekil 1 'de gösterildiği üzere bunlar temel katmanlar ve tamamlayıcı katmanlar olarak

sınıflandırılabilir. Temel katmanlar fiziksel (PHY) ve ortama erişim (MAC) katmanlarıdır. PHY katman, kablosuz medyada yayılacak olan sinyallerin üretilmesi /algılanması ve işlenmesini kotarır. MAC katmanı ise aynı medyayı kullanan aygıtların bu ortamda kendi verilerini sorunsuzca hedefe iletebilecekleri uygun anı ve yöntemi belirleyen algoritmaları içermektedir. Tüm düğümlerin birbirleriyle haberleşebildikleri aynı kapsama alanları içerisinde, bu iki temel katman yeterli olsa da çok sayıda düğümden oluşan geniş bir lokasyona dağılmış KSA sistemlerde verilerin hedefe yönlendirilmesini sağlayan tamamlayıcı bir ağ katmanına (NWK) ihtiyaç duyulmaktadır.

Her ne kadar KSA 'larda çok yaygın olmasa da veri çeşitliliğinin ve yoğunluğunun yüksek olduğu sistemlerde veri taşıma katmanı da (TRS) kullanılabilir. Uygulama katmanı (APP) ise KSA sistemin veri toplama, sorgulama ve yönetim karakteristiğini belirleyen, kullanıcının etkileşebildiği katmandır. Bu katmanlara ek olarak düğümlerde enerji tüketimini, veri güvenliğini ve hareketli senaryolarda (mobilité) konum farkındalığını sağlayan yardımcı tamamlayıcı katmanlarda bulunabilmektedir. Bu yardımcı tamamlayıcı katmanlar diğer katmanlar içerisinde dahili olarak bulunabilmekle beraber bunlarla bütünsel olarak da çalışabilmektedirler.

Bugün literatürde pek çok katman teknolojisi bulunmakla beraber [4-6] pratik ve ticari alanda genel kabul görmüş KSA protokol teknolojisi 802.15.4, Bluetooth ve WiFi 'dir [7-9]. Bunlardan Bluetooth ve WiFi kısıtlı düğüm özelliklerini çok dikkate almadıklarından KSA sistemlerde çok tercih edilmezler. KSA sistem karakteristiklerini esas alan standartlaşmış 802.15.4 protokol yığıtı ise temel PHY ve MAC katmanlarından oluşmaktadır. Bu standart protokol teknolojisi diğer KSA protokol teknolojilerine altlık oluşturmuş, ZWave ve ZigBee gibi diğer KSA teknoloji standartlarının doğmasına ön ayak olmuştur [10,11]. Bunlardan ZigBee teknolojisi bugün en yaygın KSA teknolojisi durumundadır ve pek çok ticari/akademik uygulamada kullanılmaktadır. ZigBee, NWK katmanında örgü (Mesh) yönlendirme tekniğini kullanırken APP katmanında kendine özgü kimliklendirme ve soyutlama yöntemleri kullanılmaktadır.



Şekil 1. KSA sistemlerde katmansal yapı

KSA düğüm teknolojileri esasen iki alanda değerlendirilmelidir. Bunlar ticari alanlar ve akademik/ArGe alanlarıdır. Pek çok durumda düğüm teknolojisi ve taşıdığı özellikler, kullanıldıkları senaryoya veya koşturdukları protokol yığıt teknolojisine göre değişiklik göstermektedir. Örneğin ZigBee katmansal protokol yapısı üzerinde çalışan düğümlerin bir kısmı sabit enerjili olmak zorundayken (Full Function Device - FFD) bir kısmı belirli bir çalışma düzenine sahip, batarya ile çalışan düğümler (Reduced Function Device - RFD) olabilir. Bu da her bir düğümde bulunabilecek donanım özelliklerini değiştirebilmektedir. Ancak her halükarda temel birimler tüm düğüm teknolojilerinde aynıdır. Bu temel birimler mikrokontrolör (MCU), radyo ünitesi/protokol yığıtı, sensör/aktuatör modülü ve güç birimidir. Düğümlerde, 4 MHz -50 MHz MCU, 2 KB – 128 KB RAM , 32KB – 1 MB flash aralıklarında donanımsal özellikler bulunabilmektedir.

Bununla beraber akademik ve askeri alanlarda kullanılan düğüm teknolojileri üzerinde gömülü bir işletim sistemi (TinyOS, Contiki vb.) çalıştırabilirken, diğer taraftan genel ticari uygulamalarda belirli bir KSA protokolü üzerinde basit bir bootloader çalıştırabilen düğüm teknolojileri kullanılabilir. Doğal olarak skaler veri toplayan düğüm özellikleri, multimedia veri toplayan düğüm özelliklerine göre daha mütevazî olacaktır. Bu bağlamda TelosB, MicaZ, Imote, Stargate, MeshEye gibi biraz daha gelişmiş KSA düğümleri genellikle araştırma geliştirme uygulamalarda tercih edilirken XBee, NXP132xx, Wasmote gibi amaca yönelik düğümler/modüller daha çok ticari alanlarda kullanılmaktadır [12-16].

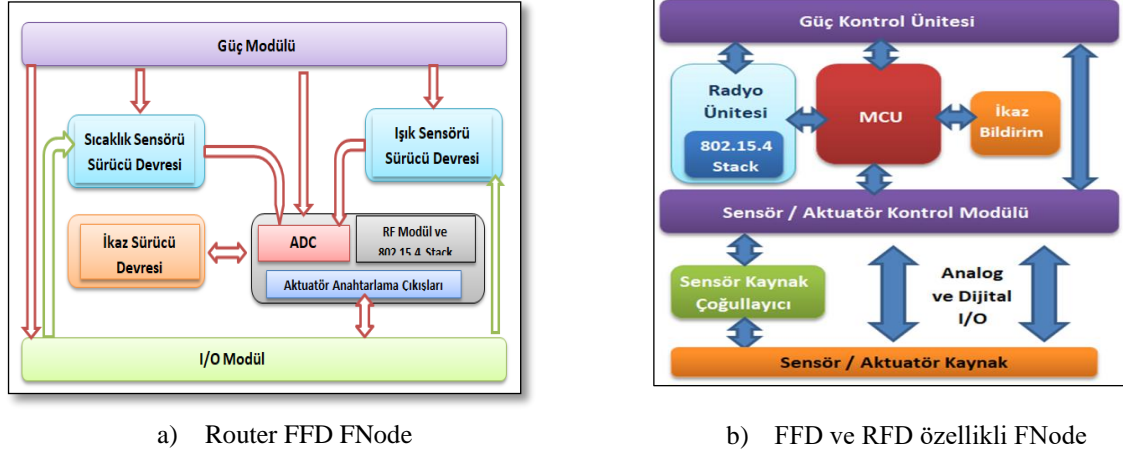
### 3. Geliştirilen KSA Düğüm Yapısı: FNode

Bu çalışmada gerçekleştirilmiş olan FNode isimli iki farklı KSA düğüm yapısı daha çok uygulamaya yönelik olarak geliştirilmiştir. FNode 'lar 802.15.4 temelli olup ZigBee teknolojisinin yanında farklı NWK ve APP katmanlarının da yazılıp geliştirilebildiği esnek bir yapıya sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

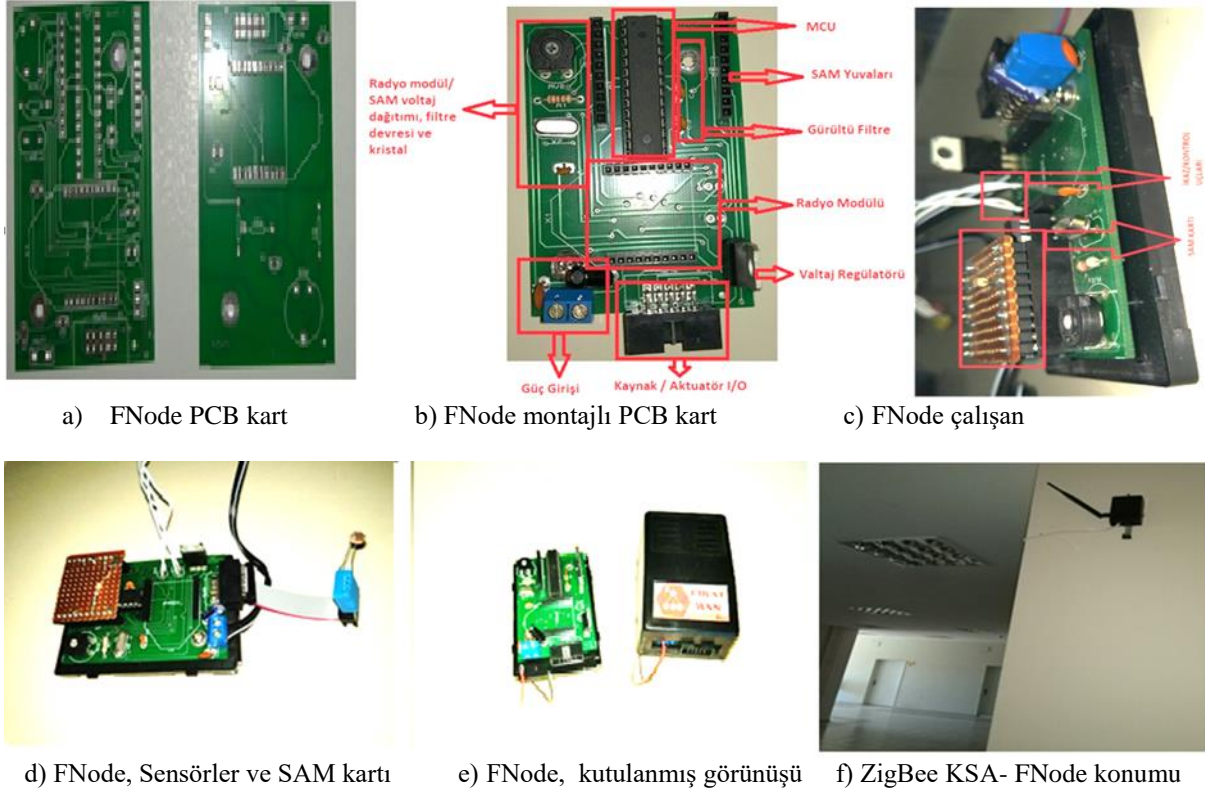
Şekil 2.a 'da görülen FNode Yönlendirici düğüm kartı; güç modülü, RF iletişim modülü, sensör ve aktuatör sürücü devrelerinden oluşmuştur. Bu düğüm, FıratZigBee omurgasının genişletilmesini sağlamak, veri paketlerini merkezi veri toplama birimine yönlendirmek, RFD düğümlerin ağa katılmasını sağlamak için tasarlanmıştır. Ayrıca üzerinde bulunan analog sürücü ve sensör devreleri yardımıyla ortamdan sıcaklık ve ışık verilerini almak, mevcut çıkış portları ile aktuatör sistemleri açıp kapayabilmek, mobil düğümlerden RSSI (Received Signal Strength Indication) değerlerini okumak gibi işlevleri yerine getirecek şekilde düzenlenmiştir. Fiziksel, MAC ve ZigBee Ağ katmanı fonksiyonlarına sahiptir. Sürekli bir enerji kaynağından beslenir, FFD özelliklidir.

Şekil 2.b'de görülen FNode uygulama kartı ise, güç modülü, RF ve 802.15.4 stack modülü, Mikrokontrolör (MCU), Sensör/Aktuatör Modülü ve sensör çoğullayıcı biriminden meydana gelmiştir. Hem FFD hem de RFD özelliğindeki bu kart; Sensör /Aktuatör Modül (SAM) kartı ile Analog ve Dijital sensör okuyabilme, aktuatör anahtarlama, hem "router" hem de "End Device" olarak çalışabilme, uzaktan ayarlanabilir uyuma periyodu ayarlanabilme, uygulamaya yönelik "end point" ve protokol tanımlanabilme, sensör kaynak çoğullayıcı aracılığı ile daha fazla analog dijital sensör okuyabilme özelliğine sahiptir. Atmel328P MCU kullanılarak, Zigbee veya diğer ağ teknolojileri için uygulama katmanı yazılımlarının oluşturulmasına imkan sağlanmıştır. Aynı bir kart olarak tasarlanan Sensör/Aktuatör Modülü (SAM) ise iki görevden sorumludur. Sensör/Aktuatör kontrolleri MCU tarafından SAM üzerinden yapılmaktadır. Örnek olarak bir FNode 'un uyuma periyodunda ilgili Sensör/Aktuatör kaynakların pasif veya aktif

edilmesi SAM üzerindeki devrelerin MCU tarafından denetlenmesiyle başarılıdır.



Şekil 2. FNode 'lara ait genel blok şeması



Şekil 3. Uygulamada kullanılan FNode düğümlere ait bazı görüntüler

Böylelikle enerji tasarrufu da sağlanmış olur. Güç kontrol ünitesi her iki kart için aynıdır. Radyo devresi, MCU, Sensör/Aktuatör modülü ve diğer birimlerin ihtiyaç duydukları farklı voltaj seviyelerindeki istenen gücü sağlamak ve

kontrol etmek için tasarlanmıştır. Girişine uygulanan sabit 12 DC voltajı 3.3v, 5v, 12v seviyelerine dönüştürerek ilgili birimlere uygulanmasını sağlar. Güç kontrol ünitesinin girişindeki sabit voltaj kaynağı için bir batarya

kullanılabileceği gibi bir A.C/D.C adaptör de kullanılabilir.

Gerçekleştirilen FNode 'lara ait bazı görseller Şekil 3 'de verilmiştir. FNode ile ilgili genel teknik özellikler ise Tablo I de verilmiştir. Fnode'larda, radyo devresi ve 802.15.4 stack'ını üzerinde barındıran Digi XBee modülleri tercih edilmiştir. Bu modül Şekil 3.b'de görülen kartın radyo kısmına takılmaktadır.FNode düğümlerde bir ağa katılıp katılmadığını gösteren, veri okuma veya veri paketi gönderme/yönlendirme yaptığını gösteren ikaz ledleri de bulunmaktadır. Geliştirilen FNode'lar hem genel amaçlı ar-ge çalışmaları için hem de ZigBee-Mesh protokol temelli çalışmaya tam uyumludur. FFD tip olanlar FNode-FZR/FAZR, RFD tip olanlar ise FNode-RZR/RAZR isimli düğüm olarak adlandırılmaktadırlar.

**Tablo I.** FNode Teknik Özellikleri

FNode Özellik	Açıklama
İşlemci	Atmega
Flash Hafıza	32 kB
RAM	2 kB
Radyo Ünitesi	Digi XBee s1/s2 /PRO
Frekans Bandı	2400MHz
Kanal Sayısı	16
Veri Hızı	250 kbps
Alıcı Hassasiyeti	96 dBm (102 dBm -pro)
Protokol	802.145.4 / ZigBee
Ağ Katmanı	Mesh
Analog Sensör uyumluluğu	Var
Dijital Sensör Uyumluluğu	Var
ADC	10 bit
Açık Alan Kapsama Mesafesi	70-100 mt (1000 mt -pro)
Bina içi Kapsama Mesafesi	20-30 mt (100 mt pro)
Çalışma Voltaj Aralığı	3-12 V
Alma modunda Akım	50 mA
Boşta Akım	5-10 mA
Uyku Modunda Akım	60-80 mikroA
Uyanma Süresi	15-25 msn
Çalıştığı Sensörler	O2, CO2, Nem, Isı, Işık, IR, NH3, CO, Akım, Gerilim, Hava Basınç, Ağırlık, Noise, Accelerometer, Eğim, piezzo, Ultasonic vb.

FNode'lar mobil veya statik uygulamalar için geliştirilmiştir. Bu nedenle konum tespit uygulamaları, sağlık alanında yapılabilecek çalışmalar veya arazi uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilir. Kullanılan sensör ve aktuator tipi, kullanılacak FNode'un tipini de etkilemektedir. Şöyle ki, gaz sensörleri gibi bazı sensörler stabil okumalar için ilk çalışmaya başladıktan sonra 12-48 saat arası sürekli bir çalışma isteyebilmektedirler. Bu ise kullanılacak sensör düğümün sabit voltajlı olmasını gerektirmektedir. Bu durumda kullanılacak sensör tipi FFD tipi FNode olmak durumundadır.

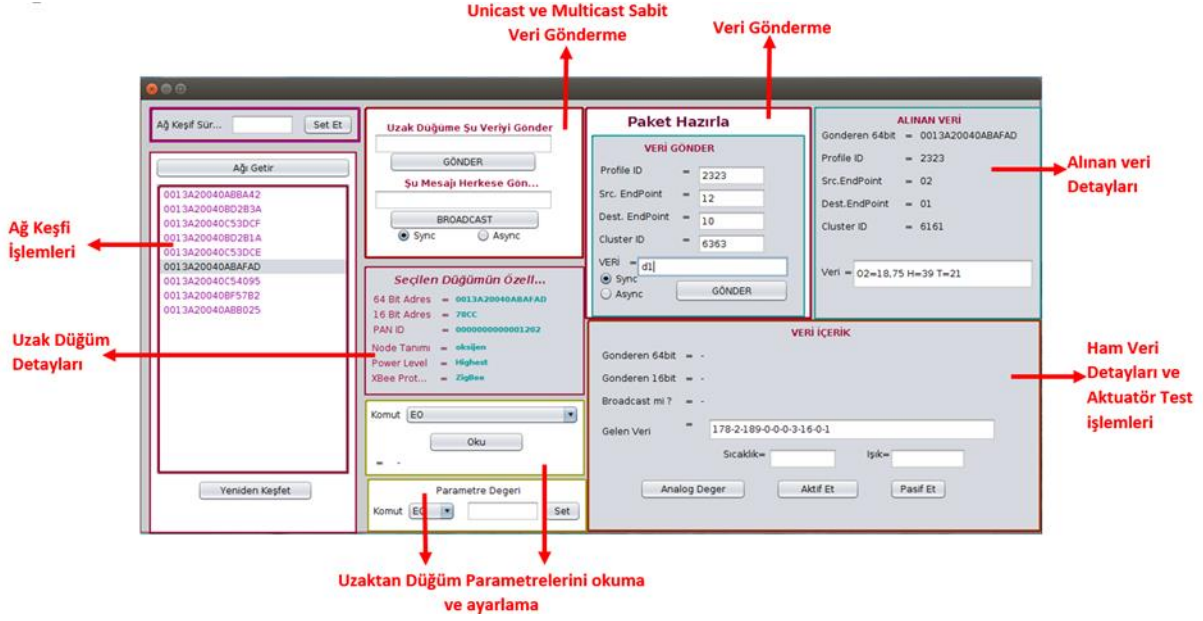
#### 4. Geliştirilen Ağ Yönetim Yazılımı: FMonitor

FNode 'lardan oluşan FıratZigBee KSA sisteminin yönetilmesi için aynı zamanda FMonitor isimli bir ağ yönetim yazılımı da geliştirilmiştir. FMonitor yazılımı JAVA ortamında gerçekleştirilmiş olup ağ yönetimini koordinatör düğüm üzerinden yapmaktadır.

FMonitor yazılımı ile ağda istenilen bir düğüme bağlanabilir, düğüm parametreleri okunabilir veya uzaktan ayarlanabilir parametreler değiştirilebilir, periyodik okumalar data kayıt modülüne gönderilebilir, ağ keşif işlemleri düzenlenebilir, senkron veya asenkron veri gönderimi yapılabilir, gelen verilerin içerikleri görüntülenebilir. Yukarıda bahsedilen özellikleri sağlayan FMonitor yazılımının uygulama arayüzü ve işlevleri Şekil 4'de gösterilmektedir.

ZigBee temelli ağlarda açık mod (Explicit Mode) ve soyut (Abstract Mode) mod şeklinde paket gönderimleri gerçekleştirilebilmektedir. ZigBee uygulama katmanına ait temel parametrelerin kullanılarak paket gönderimi veya analizinin yapıldığı açık moda ait ilgili kütüphane kodları da bu çalışma sürecinde yazılarak her iki modda da FMonitor yazılımının sorunsuzca kullanılabilmesi sağlanmıştır.

FMonitor yazılımının sunduğu asenkron /senkron paket gönderim seçenekleri ve ağ kaynak keşfi gibi özellikleri sayesinde oldukça kolay bir sistem sürdürümü/yürütümü sağlanmaktadır. FMonitor yazılımı aynı zamanda toplanan verileri uygulama tipine göre üç farklı platformda depolayabilmektedir. Bunlar ilişkisel bir veri tabanı olan MySQL, NoSQL teknolojisi olan CouchDB ve klasik text dosyalarıdır.



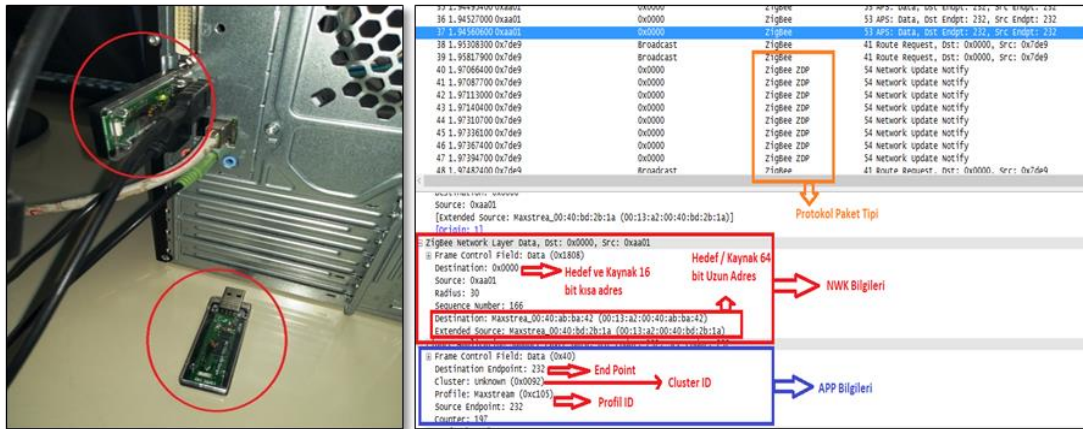
Şekil 4. FMonitor uygulama arayüzü

FMonitor yazılımı, tanımlı profil tiplerine göre farklı uygulamaları, kullandıkları endpoint'lere, cluster\_ID 'lere ve command\_ID 'lere uygun olarak analiz edebilmekte ve yönetimsel komutları bu parametrelere göre düğümlere gönderebilmektedir. Örnek olarak farklı ZigBee uygulama profillerinde bulunan sensörlerin okuma periyotlarının uzaktan değiştirilmesini sağlamak, uyuma periyotlarını ayarlamak, aktuatörleri uzaktan işletmek veya test komutları göndermek bu yazılım sayesinde kolaylıkla yapılabilmektedir. FMonitor yazılımı modüler bir yapıda tasarlanmıştır. Geliştirilmiş olan framework (arayüz ve abstarct sınıflar)

yardımıyla farklı profillere ait kütüphaneler ayrı bir ortamda tanımlanarak bu yazılıma entegre edilebilir ve otomatik çalışmaları sağlanabilir.

FıratZigBee sisteminde düğümler arasındaki veri ve komutların alışverişini sağlayan 802.15.4 protokoluna ait paket trafiğinin izlenmesi ve analiz işlemleri de NXP USB Dongle cihazı ve Wireshark analizör yazılımı aracı vasıtasıyla, FMonitor üzerinden yapılabilmektedir.

Böylece 802.15.4 temelli paket yapıları incelenerek, oluşan sistem sorunları yakalanabilmektedir. FıratZigBee de kullanılan analizör ve yazılıma ait çıktı görüntüleri Şekil 5 'de sunulmuştur.



Şekil 5. FıratZigBee ağ trafik ve paket analizör sistemleri

## 5. FıratZigBee İle Yapılan Örnek Uygulama

FıratZigBee sistemi bir bütün olarak, KSA konusunda lisans ve lisansüstü çalışmalarda gerek duyulan bir deney platformu oluşturma süreci olarak öngörülmüştür. FNode'lar ile gerçekleştirilen KSA uygulamasından amaçlanan, çevresel parametrelerin (Isı, ışık, nem, CO<sub>2</sub> v.b) periyodik olarak ölçülüp bir veri tabanına aktarılmasını sağlayan bir KSA'nın oluşturulması, kontrol edilmesi ve toplanan verilerin optimizasyonu veya küçültmesi sürecinin gerçekleştirilmesidir. Bunun için oluşturulan FıratZigbee KSA sistemi, çok katlı bir binanın iki katını (80x40x4 m ebadında ve her katta farklı büyüklükte 6 adet sınıf mekanı içermektedir) kapsama alanına alan 7 adet FNode FFD omurga düğümünden oluşmaktadır. Bu düğümler aynı zamanda ağın diğer katlara ve bina dışı ortamlara genişleyebilir olması için kullanılmaktadır.

FıratZigBee, iletişim teknolojisi olarak ZigBee'yi kullanmaktadır. Sistem, omurga ve son cihazlar olmak üzere mantıksal olarak iki kısımda değerlendirilmiştir. Şu an için son cihazlarla beraber FıratZigBee 40 adet düğüm içermektedir.

Omurga bölümü, sabit enerji noktalarına bağlı FFD FNode cihazlardan meydana gelmektedir. FıratZigBee ağının koordinatörü, MAC adresi 0013A20040ABBA42h ve NWK adresi 0000h olan FNode düğümüdür. Omurga FFD cihazlar paket yönlendirmenin yanı sıra üzerlerinde bulunan ısı/ışık gibi analog sensörlerle ortam ölçümleri, RSSI gibi ölçümler yapabilmekte ve son cihazların omurga üzerinden FıratZigBee 'e katılmalarına yardımcı olmaktadır. FıratZigBee 'nin bu omurga yapısına ait topolojik yapısı Şekil 6'da görülmektedir.

FıratZigBee, ortamdan ve sınıflardan ısı, ışık, nem, oksijen seviyesi gibi değerleri periyodik olarak almak için SAM kartlı FNode RFD düğümlerini kullanmaktadır.

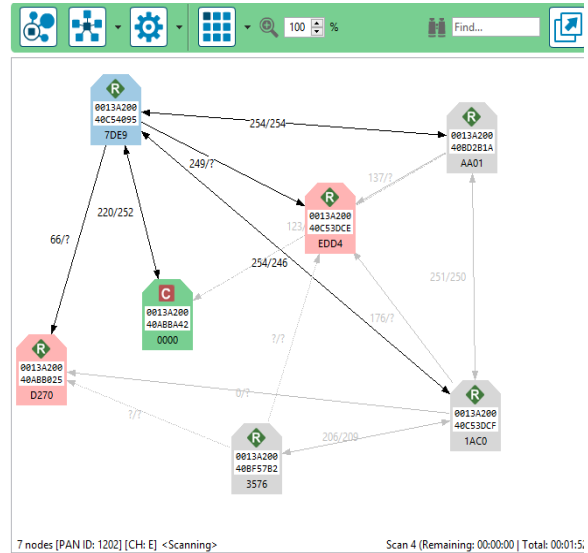
Düğüm konfigürasyonları iki adımda gerçekleştirilmektedir. İlki düğüm MCU 'ne ilgili ZigBee uygulama profilinin yüklenmesidir. Bu işlem gerek assembly gerekse daha üst seviye (C/C++, basic vb) MCU dil destekli bir platform yardımıyla yapılabilmektedir.

Uygulama profil parametreleri (endpoint, cluster\_ID vb.), ilgili radyo kütüphaneleri ve yürütüm fonksiyonları tanımlandıktan sonra herhangi bir ATMEL programlayıcı kartı ile MCU ya yüklenmektedir. İkinci adım ise radyo devresinin uygun ZigBee cihazı olarak ayarlanmasıdır. Bunun için Digi firmasının X-CTU yazılımı kullanılmakta ve bu yazılımla FFD/RFD tipi, PANID gibi ZigBee spesifikasyonları radyo modülüne yüklenmektedir.

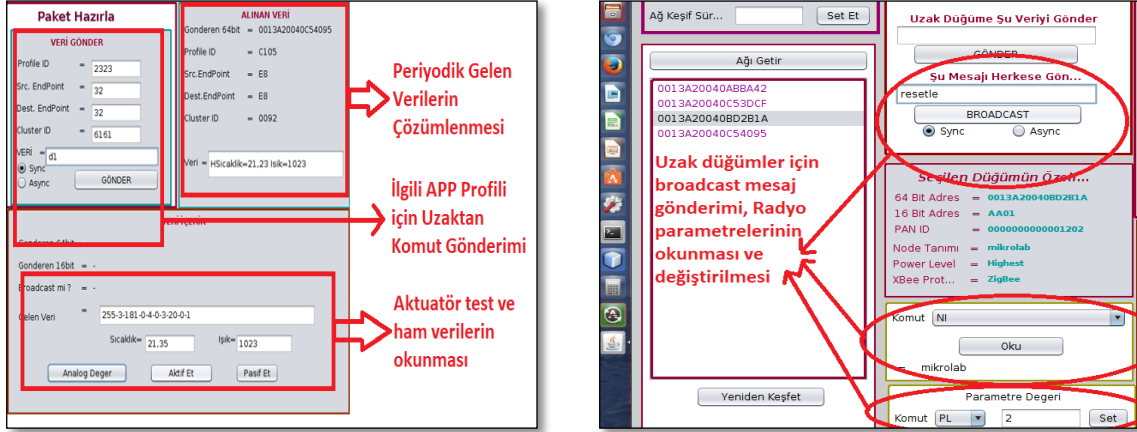
Radyo devresi ve MCU, FNode düğüm kartına takıldıktan sonra anten ve batarya tipine göre uygun kutuya yerleştirilmektedir. Sınıf içi ölçümler, mobil düğüm takibi, bina civarı ölçümler gibi ek uygulamalar bu FıratZigBee KSA üzerinden rahatlıkla yapılabilmektedir.

PAN ID olarak 1202, Profil kimliği (Profile ID) olarak 2323 ve C105'i kullanan FıratZigBee, 10-150/200-232 nolu endpoint'leri sensörler için kullanırken 151-180 nolu endpoint'leri aktuatör kaynaklar için kullanmaktadır. FNode'lardan farklı komutlarla (ClusterID, CommandID) istenen veri şekli ve boyutu rahatlıkla değiştirilebilmektedir.

Oluşturulan FıratZigBee ağının gözlenebilmesini sağlayan Fmonitor yazılımının arayüzü ise Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6. FıratZigBee topolojik görüntüsü



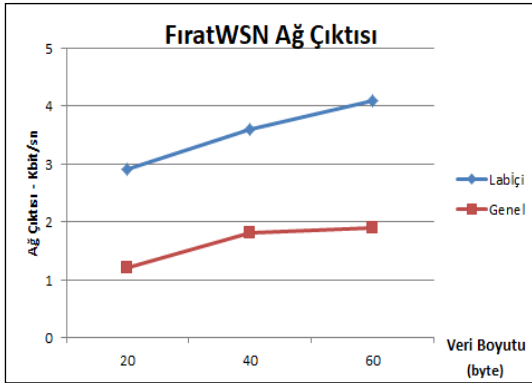
a) Veri çözümleme ve aktuatör test

b) Radyo parametrelerinin okunması/değiştirilmesi

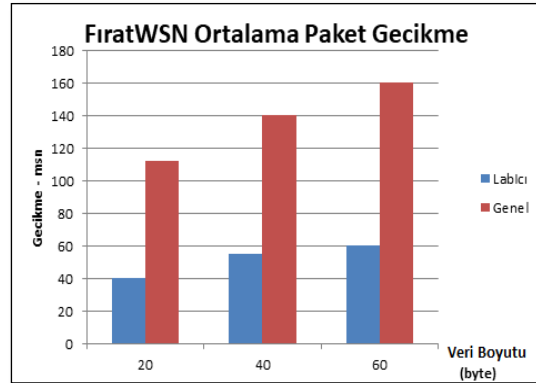
Şekil 7. FMonitor yazılımı üzerinden örnek yönetim işlemleri.

FMonitor yazılımı ya ön tanımlı olarak ya da daha sonradan eklenen profil kütüphaneleri yardımıyla farklı profillere ait endpoint, cluster\_ID ve command\_ID çözümlemelerini otomatik olarak yapabilmektedir. Ağ yöneticisi

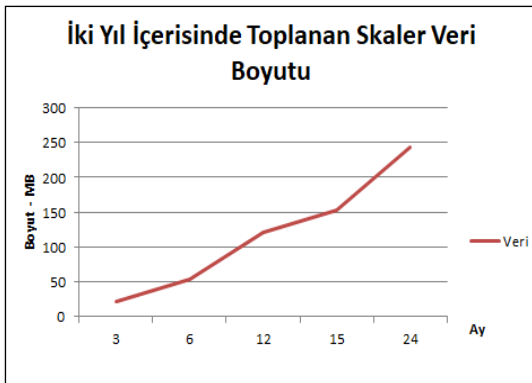
tarafından bu parametreler üzerinden gerçekleştirilen bazı yönetimsel işlemler Şekil 7 'de gösterildiği gibi yapılabilmektedir. Şekil 8 'de ise FıratZigBee için bazı performans test değerlerine ait grafikler verilmiştir.



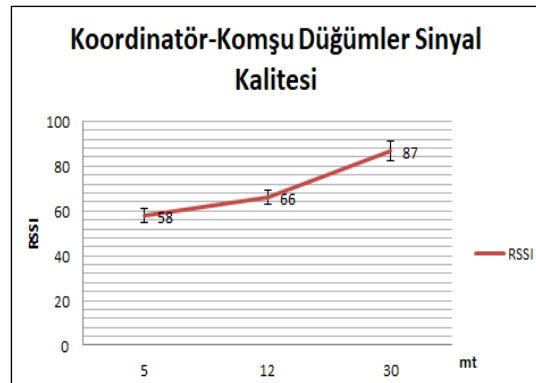
a) Ortalama ağ çıktısı (throughput)



b) Ortalama gecikme



c) Toplanan veri boyutu



d) Koordinatör –komşu düğüm sinyal kalitesi

Şekil 8. FıratZigBee genel ağ performans verileri



Şekil 8.a, binadaki laboratuvar içi ve genel ağ yapısı içerisinde iletilen 20, 40 ve 60 byte'lık veri boyutları için FıratZigBee ağ çıkışını (throughput) göstermektedir. Ağdaki veri toplama periyotları, düğüm sayıları, düğüm üzerinde kullanılan buffer veri yapısı ve boyutu ağ çıkışını doğrudan etkileyen parametreler olup, kullanılan sensör kaynaklarındaki heterojenlikten dolayı, ölçüm sonuçları mevcut durumdaki ortalama sonuçları göstermektedir.

Şekil 8.b ortalama gecikme değerlerini, c toplanan veri boyutunu (MB olarak), d ise koordinatör düğümün kapsama alanı içerisinde bulunan farklı uzaklıklardaki komşu düğümlerden aldığı sinyal seviyelerini göstermektedir. Sensörlerden alınan veriler, büyük veri optimizasyonu açısından özel bir

formatta text dosyasında saklanmaktadır. Şekil 9 'da verilen veri saklama formatında, sensörlerden (kaynaklardan) okunan değerlerin yanısıra kaynak düğüm, veri alınan son nokta (end point), cluster\_ID, tarih ve zaman gibi ek verilerde tutulmaktadır.

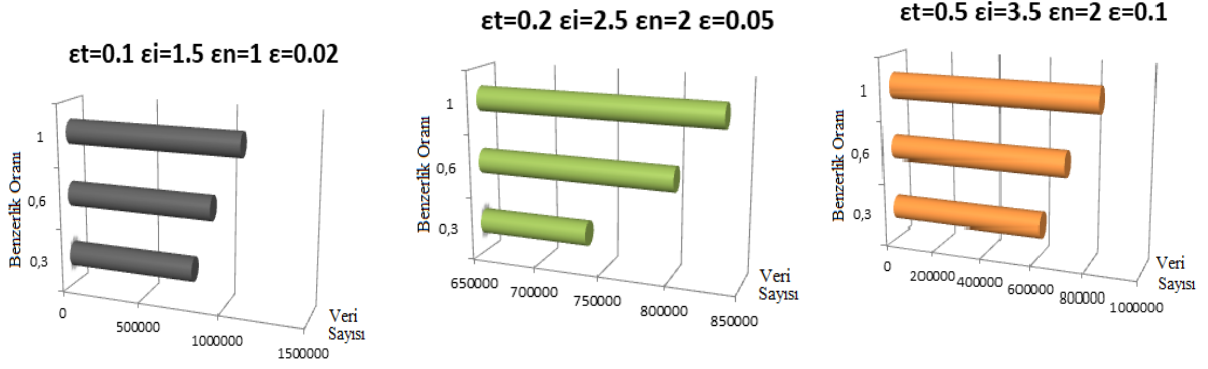
Toplanan verilerin, hem kapladığı alan hem de hızlı arama açısından optimum şekilde depolanması da KSA'lar için oldukça önemlidir. Zaman içerisinde toplanan veri boyutlarının çok hızlı artması çoğu zaman kaçınılmaz olmaktadır. Toplanan verilerde tekrarlar ve artıklıklar doğal olarak depolama sistemindeki verimi düşürmektedir. Bu problemi vurgulamak ve çözmek açısından FıratZigBee ağından toplanan sensör verileri üzerinde optimizasyon çalışması da gerçekleştirilebilmektedir.

DüğümID;PANID;ClusterID;Endpoint;KaynakVeri1;.....; KaynakVeriN;Tarih;SaatVerisi;Lokasyon;

Şekil 9. Bina içi düğümlerden alınan veriler için text veri saklama formatı



Şekil 10. FıratZigBee ağından toplanan veri dosyalarının optimizasyonu



a)  $\varepsilon_t = 0.1, \varepsilon_i = 1.5, \varepsilon_n = 1, \varepsilon = 0.02$    b)  $\varepsilon_t = 0.2, \varepsilon_i = 2.5, \varepsilon_n = 2, \varepsilon = 0.05$    c)  $\varepsilon_t = 0.5, \varepsilon_i = 3.5, \varepsilon_n = 2, \varepsilon = 0.1$

Şekil 11. Farklı eşik değerleri için DA işlem sonuçları

Ortak bölgesel düğümlerden elde edilen eş zamanlı benzer verilerin, tekrar verilerin ve bozuk verilerin saptanması; sistem taraflı optimum veri toplama algoritmaları (Data Aggregation - DA) yardımıyla başarılabilmektedir. FıratZigBee alt yapısında toplanan ısı, nem, oksijen verileri üzerinde gerçekleştirilen DA işlemleri “Dice Benzerlik Fonksiyonu” temellidir [17]. Denklem 1 ‘de ifadesi verilen Dice benzerlik fonksiyonu iki veri seti ( $D_1, D_2$ ) arasındaki ortak verilere göre sonuç döndürmektedir. Veri setleri arasındaki benzerlik oranı ise Denklem 2 ‘de gösterildiği gibi ön tanımlı bir eşik değere ( $\varepsilon$ ) göre belirlenmektedir. Burada  $d_i, d_j \in D_1, D_2$  ‘dir. Bu denklemlere göre gerçekleştirilen DA işlemleriyle, 0.3 ‘den 1 ‘e kadar farklı benzerlik oranları için veri küçültme işlemleri, FıratZigBee ağı vasıtasıyla toplanmış olan yaklaşık 1.1 milyon veri üzerinde yapılmış ve oluşturulan ortak lokasyonlara göre denenmiştir. Örnek bir veri küçültme işleminden önce ve sonra oluşan veri dosya yapıları Şekil 10 a ve b’de verilmiştir.

$$D(D_1, D_2) = \frac{2 \times |D_1 \cap D_2|}{|D_1| + |D_2|} \quad (1)$$

$$Bnz(d_i, d_j) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } ||d_i - d_j|| < \varepsilon \\ 0 & \text{Diğer durumlar} \end{cases} \quad (2)$$

Benzerlik oranlarının belirlenmesi uygulama ve senaryo bağımlı bir parametre olup yönetimsel

açıdan bilimsel veya gözlemsel analizlerle saptanan değerlerdir. Benzer şekilde bu oranlar farklı sensör kaynakları için değişkenlik gösterebilmektedir. Bu çalışmada, ısı, nem ve Oksijen eşlik karşılaştırmaları için farklı eşik değerleri ( $\varepsilon_t$  sıcaklık,  $\varepsilon_i$  ışık,  $\varepsilon_n$  nem,  $\varepsilon$  oksijen) kullanılmıştır. Bu eşik değerleri sensör tipine göre değişiklik göstermektedir ve uygulama özelliğine göre belirlenmektedir.

Uygulama sürecinde toplanan ısı, nem ve oksijen veri setleri için belirlenmiş  $\varepsilon$  eşik değerlerine ve istenilen benzerlik oranlarına (0.33, 0.66 ve 1) uyan veri setlerinin benzer kabul edilerek tek bir veri seti olarak tanımlandığı deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 11’de verilmiştir. Şekil 11.a’daki  $\varepsilon$  eşik değerlerine göre en düşük benzerlik oranı (%33) için yaklaşık 800 bin veriye kadar düşüş sağlanırken, en yüksek veri benzerlik oranı için (%100) bu değer yaklaşık 1.08 milyon olmuştur. Şekil 11.b ve c’den görüldüğü gibi eşik değerlerdeki artışlar bu veri setlerini daha da düşürebilmektedir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken temel nokta veri küçültmede yaşanacak veri kayıplarının karar mekanizmasını doğrudan etkileyeceğidir. Bu nedenle uygun eşik değerlerinin uygulamaya göre değişeceği dikkate alınmalıdır.

## 6. Sonuç

Bu makalede Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Kablosuz Sensör Ağları laboratuvarında geliştirilen FıratZigBee kablosuz

senör ağı sistemi ve gerçekleştirme detayları sunulmuştur. FıratZigBee KSA, ZigBee teknolojisi temelli olup omurga yapısı genişlemeye uygundur. FıratZigBee, laboratuvar kapsamında geliştirilen ve FNode olarak isimlendirilmiş düğümlerden oluşmaktadır.

Bu düğümler hem FFD hem de RFD tipi olarak çalışabilmektedir. İşlemci olarak ATMEL, radyo ünitesi olarak Digi firmasına ait teknolojileri kullanmakta olup geliştirilen SAM (Senör Aktuör Modülü) kartları yardımıyla farklı senör ve aktuör kaynaklarla aynı anda rahatlıkla çalışabilmektedir. Buna ek olarak geliştirilmiş olan FMonitör yazılımı sayesinde FıratZigBee KSA ve düğümleri uzaktan kontrol edilebilmekte ve toplanan veriler sistem üzerinde depolanabilmektedir. Sensörlerden toplanan verilerin optimizasyon operasyonları için “Dice Benzerlik Fonksiyonu” kullanılmış ve gereksiz veri depolanmasının önüne geçilmiştir.

FıratZigBee KSA sisteminin başlangıç amacı, KSA konusunda lisans ve lisans üstü çalışmalar için gerçek bir uygulama platformu geliştirmektir. Gerçekleştirilen bu sistem halihazırda deneysel uygulamalarda başarıyla kullanılmaktadır. Bir sonraki safhada IoT teknolojileri yardımı ile diğer üniversiteler ve araştırma merkezleri ile ortak KSA uygulama platformlarının ve sanal KSA uygulama platformlarının kurulabilmesine yönelik bir altyapı sağlayabileceği, önemli bir sonuç olarak görülmektedir.

## 7. Kaynaklar

1. Rawat P., Singh K.D., Chaouchi H., Bonnin J. M. (2014). Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies, *The Journal of Supercomputing*, **68**:1-48
2. Yildirim G., Tatar Y. (2017). On WSN heterogeneity in IoT and CPSs, *Computer Science and Engineering (UBMK) International Conference*, 5-8 Oct., Antalya, Turkey, doi: 10.1109/UBMK.2017.8093421
3. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. (2002). A survey on sensor networks, *IEEE Communications Magazine*, doi: 10.1109/MCOM.2002.1024422
4. Demirkol I., Ersoy C., Alagoz F. (2006). MAC protocols for wireless sensor networks: a survey, *IEEE Communications Magazine*, doi: 10.1109/MCOM.2006.1632658
5. Guo W., Zhang W. (2014). A survey on intelligent routing protocols in wireless sensor networks, *Journal of Network and Computer Applications*, Vol: **38**: 185-201, doi: 10.1016/j.jnca.2013.04.001
6. Prathap U., Deepa P. Shenoy, Venugopal K.R., Patnaik L.M. (2012). Cloud and Services Computing Wireless Sensor Networks Applications and Routing Protocols: Survey and Research Challenges, *Cloud and Services Computing (ISCOS) International Symposium*, 17-18 Dec., Mangalore, India
7. Khanafer M., Guennoun M., Mouftah H. T. (2013). A Survey of Beacon-Enabled IEEE 802.15.4 MAC Protocols in Wireless Sensor Networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16:2,doi:10.1109/SURV.2013.112613.00094
8. Lakshmisudha K., Arun C. (2013). Research on power optimization in physical and MAC layer of wireless sensor networks — A survey, *Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP) International Conference*, 1-2 March, Gujarat, India, doi: 10.1109/ISSP.2013.6526915
9. Davis A., Chang H. (2012). A Survey Of Wireless Sensor Network Architectures, *International Journal of Computer Science and Engineering Survey (IJCES)*, **3**:6
10. Kalaivani T., Allirani A., Priya P. (2011), A survey on Zigbee based wireless sensor networks in agriculture, *Trendz in Information Sciences and Computing (TISC)*, 3rd International Conference, 8-9 Dec., Chennai, India
11. www.z-wave.com, en son ziyaret 09.09.2018
12. Narayanan R. P., Sarath T. V., Vineeth V. V. (2016). Survey on Motes Used in Wireless Sensor Networks: Performance & Parametric Analysis, *Wireless Sensor Network*,: **8**: 67-76.
13. Soua R., Minet, P. (2011). A survey on multichannel assignment protocols in Wireless Sensor Networks, *Wireless Days (WD), IFIP, Niagara Falls, Canada*, doi: 10.1109/WD.2011.6098201
14. [http://wsn.cse.wustl.edu/images/e/e3/Imote2\\_Data sheet.pdf](http://wsn.cse.wustl.edu/images/e/e3/Imote2_Data_sheet.pdf)
15. <https://www.eol.ucar.edu/isf/facilities/isa/internal/CrossBow/DataSheets/stargate.pdf>
16. Farooq M. O., T. Kunz, (2014). Wireless Sensor Networks Testbeds and State-of-the-Art Multimedia Sensor Node, *Application Mathematicazl Information Science*, **8**: 935-940
17. Medlej M. (2014). Big data management for periodic wireless sensor networks, *Doctoral Thesis, The University of Franche Comté, Besançon, France*.



## Nanoyapılı Hegzagonal Bor Nitrür Üretimi ve Karakterizasyonu

**Handan AYDIN**

Munzur Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 62000 TUNCELİ  
haydin@munzur.edu.tr

(Geliş/Received:22.05.2018; Kabul/Accepted:02.07.2018)

### Özet

h-BN fiziksel özellikleri ve kimyasal kararlılığı sebebiyle geniş optik enerji bandı aralığına sahip olan bir III- V grubu bileşiktir. Eşsiz özelliklere sahip, yapay bir malzeme olan hegzagonal bor nitrür pek çok sektörde kullanımı giderek artmaktadır. Bor nitrür, farklı metotlar ile üretilebilmektedir. Bu çalışmada, borik asitten bor oksit üretilmiş ve bor oksitin 850 °C'de nitrürlenmesi ve 1500 °C'de sinterlenmesi sonucunda hegzagonal bor nitrür (h-BN) elde edilmiştir. Üretilen hegzagonal bor nitrürün saflığını, bal peteği ve tabakalı yapısını belirlemek amacıyla XRD, SEM, FT-IR ve optik ölçümler ile karakterize edilmiştir. Numunenin XRD spektrumu, Bor Nitrür nanotozların hegzagonal BN yapıda ve polikristalin olduğunu ortaya koymaktadır. BN numune için kristal boyutu 71.2 nm olarak bulunmuştur. SEM fotoğrafları nano tanelerden oluşan yapıyı doğrulamıştır. Elde edilen sonuçlar BN numunesinin nanoyapıya sahip olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler :** Hegzagonal Bor Nitrür, Nitrüleme, Borik Asit, Nano BN

## The Production and Characterization of Nanostructured Hexagonal Boron Nitride

### Abstract

h-BN is III-V group compound having broad optical energy band gap due to its physical properties and chemical stability. Hexagonal boron nitride, an artificial material with unique properties, is increasingly used in many sectors. Boron nitride can be produced by different methods. In this study, hexagonal boron nitride (h-BN) was produced from boron oxide nitriding at 850 ° C and by sintering at 1500 ° C. To determine the purity, honey pheasant and stratified structure of the produced hexagonal boron nitride, It is characterized by XRD, SEM, FTIR and optical measurements. XRD patterns of the sample reveal that the Boron Nitride nanopowders are polycrystalline of hegzagonal BN structure. The crystallite size for BN sample were found to be 71.2 nm. Scanning Electron microscope (SEM) photographs demonstrated a nano-grain structure. The obtained results indicate that the BN sample have the nanostructure.

**Keywords :** Hexagonal Boron nitride, Nitriding, Boric Acid, Nano BN

### 1. Giriş

Bor nitrür (BN) üstün kimyasal, elektriksel ve ısı özelliklere sahip bir bileşik olup hegzagonal (h-BN), würstitik (w-BN) ve kübik (c-BN) bor nitrür yapılarına rastlanmaktadır. Bor Nitrür'ün kristalin yapısı karbona benzemektedir. Bu nedenle hegzagonal bor nitrür genellikle beyaz grafit veya beyaz karbon olarak isimlendirilir [1,2].

Doğada bulunmayan yapay bir malzeme olan hegzagonal bor nitrür, bor ve azotun bir araya getirilmesiyle üretilmektedir. Hegzagonal bor nitrür, sıcaklık ve basınç etkisiyle kübik bor nitrüre dönüştüğünde, elmasın tipik özelliklerine

benzer özelliklere sahip olabilmektedir. [3-7]. Tam teşekkül etmiş BN ile grafitin latis parametreleri birbirine çok benzerdir. BN ve grafit için sırasıyla  $a_{BN}=2,504 \text{ \AA}$ ,  $c_{BN}=6,661 \text{ \AA}$ ,  $a_G=2,456 \text{ \AA}$  ve  $c_G=6,696 \text{ \AA}$ 'dır. B-N için bağ uzunluğu 1,446 Å, C-C bağ uzunluğu ise 1,45 Å 'dur. Tabakalar arası mesafe h-BN için 3,33 Å, grafit için 3,34 Å'dır. h-BN'ün grafitten farkı ise beyaz oluşu ve yüksek elektrik direncidir. Saf ve hatasız h-BN saydamdır, grafit ise siyahtır. BN tozları dokununca ipeksi dokunuş hissettirir. Monolitik BN'ler çok kolay işlenebilir ve toksik değildirler [8-12].

Bor Nitrür'ün tabakalar arası bağları zayıf olduğundan, düzensiz tabakalaşma çok kolay

olur. Birbirine paralel veya dik yönde geliş güzel dizilmiş olan bu tabakalar arasında boşluklar oluşur. Oluşan boşluklar ise, kullanım sırasında malzemenin ısı şok direncini artırır. Gözenekli yapısı, düşük elastisite modülü, yüksek ısı iletkenliği ve ısı genişleme özellikleri nedeniyle, sıcak preslenmiş BN' ün ısı şok dayanımı çok iyidir.

Bor Nitrür, yüksek sıcaklıklarda yarıiletken özellik gösterir. Ölçülen ve hesaplanan yasak enerji aralığı değerleri farklılıklar gösterebilir. Fakat, genel olarak bor nitrürün yasak enerji aralığının 5.2 eV olduğu kabul edilir. Buna ek olarak, dielektrik sabitinin de literatürde farklı araştırmacılar tarafından birbirine yakın ama değişik değerlerde verildiği çalışmalara rastlamak mümkündür. Birçok özellikleri bir arada bulundurması nedeniyle BN ve ürünlerinin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bor nitrür, taşıdığı yüksek ısı şok direnci, ısı iletkenlik, elektriksel yalıtıcılık, kimyasal kararlılık ve yağlayıcılık gibi üstün özelliklere sahip sentetik bir malzemedir. Bu özellikleri sayesinde Bor Nitrür, yüksek sıcaklık uygulamalarında, elektrik-elektronik endüstrisinde, seramik-kompozit malzemelerin yapımında ve kimya endüstrisinde toz, sprej veya macun şeklinde kullanılmaktadır. [13-21].

Ülkemiz (Türkiye) bor kaynakları, 2,5 milyon tonluk rezerv ile dünya rezervlerinin % 63'ünü oluşturmaktadır. Son yıllarda özellikle mühendislik seramiklerinin gelişmesine bağlı olarak sektörde üretim yapan mevcut üreticiler, tamamen dışarıya bağımlı özel bor içeren seramik hammaddeleri ile çalışmaktadırlar. Özellikle bor sektöründe dünya piyasasına hakim olmamıza rağmen, ülkemiz koşullarında işlenmiş bor ürünleri ve türevleri üretilmemektedir.

Genel olarak bor nitrür, çeşitli metotlarla üretilebilmektedir. Literatürde, sıklıkla rastlanan üretim metotları, direk redüksiyon ve azotlama, karbotermal redüksiyon, bor bileşiklerinin amonyak ile reaksiyonu, bor oksit'in moleküler azot ve hidrojenle reaksiyonu, azot içeren bileşiklerin bor oksit veya oksijen içeren borlu bileşiklerle reaksiyonu, alkali element içeren sistemlerden bor nitrür eldesi ve amonyaklı bileşiklerden bor nitrür eldesi şeklinde verilebilir.

Bu çalışmada ise, bor oksitin amonyakla nitrülenmesi yoluyla h-BN üretilmiş ve üretilen bu nano tozların karakterizasyonu yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Bor nitrür nanotozların hazırlanması

Bu çalışmada, başlangıç maddesi olarak Sigma Aldrich firmasından temin edilen borik asit ( $H_3BO_3$ ) kullanılmıştır. Borik asit' in 500 °C'ye ısıtılması sonucunda  $B_2O_3$  elde edilmiştir. Elde edilen bor oksit bir tüp fırın içerisine yerleştirilmiş ve 850 °C'de (1 L/dak) Azot (N) gazı ile 2 saat boyunca nitrüleme işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra oda sıcaklığına doğal olarak soğuması sağlanmıştır. Isıtma ve soğutma işlemi sırasında N gazı verme işlemi devam etmiştir. Bu işlem sonucunda ham bor nitrür elde edilmiştir. Elde edilen bu ham bor nitrürde, bor oksit, kalsiyum borat fosfat gibi çeşitli safsızlık fazları mevcuttur. Bu safsızlıklar ise, liç işlemi ile uzaklaştırılmıştır. Saflaştırılmış üründe bir miktar kalsiyum borat fosfat safsızlığına rastlanmıştır. 900 °C' de 1 saat süreyle yapılan kalsinasyon ısı işlemiyle kalsiyum borat fosfat uzaklaştırılmıştır. Kalsinasyon sonrası elde edilen tozlar, laboratuvar tipi hidrolik press yardımıyla 5 ton basınç altında 1cm çapında pellet formunda şekillendirilmiştir. Pellet halindeki numunenin, 1500 °C'de sinterlenmesi ile hegzagonal bor nitrür (h-BN) oluşması sağlanmıştır.

### 2.2. Karakterizasyon teknikleri

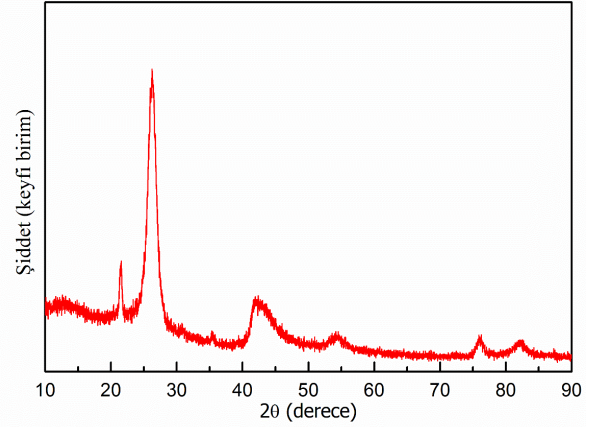
Hidrolik pres ile tablet olarak şekillendirilen numunenin yüzeyi temizlenip, ardından Denton Vacuum Desk V kaplama cihazı yardımıyla 30 saniye boyunca altın ile kaplanmıştır. Hazırlanan numunenin nano boyuttaki yüzey morfolojisini belirlemek için Jeol JSM-7001F marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Hegzagonal Bor Nitrür'ün kimyasal bağ karakterizasyonu için Thermo Scientific Nicolet iS5 marka fourier dönüşümlü infrared spektrofotometreden faydalanılmıştır.

Numunenin optik karakterizasyonu Shimadzu UV-VIS-NIR 3600 model spektrofotometre ile 200–1200 nm dalga boyu aralığında alınmıştır. Tüm ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.

### 3. Deneysel Sonuçlar

#### 3.1. XRD analiz sonuçları

Hazırlanan toz halindeki numuneden elde edilen X-ışını difraksiyon deseni yardımıyla, piklerin şiddetlerine ve yarı pik genişliklerine bakılarak malzemenin kristalleşmesi hakkında bilgi edinilmiştir. İyi bir kristalleşme seviyesine sahip malzemenin X-ışını kırınım spektrumu, şiddeti minimum olan bir zemin üzerinde bulunan yüksek şiddetli ve yarı pik genişlikleri dar olan piklere sahiptir. Eğer yarı pik genişlikleri geniş ve pik şiddetleri düşük ise kristalleşme seviyesinin iyi olmadığı söylenebilir [26].



Şekil 1. h-BN numunesine ait X-ışını kırınımı analiz sonuçları.

Tablo1. h-BN numunesine ait kristal yapı parametreleri.

	2θ (°)	Pik Şiddeti (Count)	Pik Şiddeti (%)	h	k	l	d (Å)	Kristal Yapısı	Kristal boyutu (nm)
BOR NİTRÜR	26,771	970	100	0	0	2	3.32738	Hegzagonal	71,202
	41,594	274	28,2	1	0	0	2.16949		
	43,885	252	26	1	0	1	2.06140		
	50,161	116	12	1	0	2	1.81721		
	55,163	137	14,1	0	0	4	1.66369		
	59,56	70	7,2	1	0	3	1.55093		
	71,402	67	6,9	1	0	4	1.32001		
	75,926	129	13,3	1	1	0	1.25222		
	82,185	126	13	1	1	2	1.17196		

Bu çalışmada elde edilen numunenin kırınım spektrumları incelenerek malzemenin kristal yapısı belirlenmiştir. Ayrıca ilgili düzlemlerin Miller indisleri verilmiş ve sonuçlar JCPDS kartı ile desteklenmiştir.

Ayrıca yine X-ışını kırınımı sonucu kullanılarak numunenin kristal büyüklüğü, Debye-Scherrer denklemi olarak bilinen,

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

bağıntısı yardımı ile hesaplanmıştır. Bu denklemde;  $D$  kristal boyutu,  $\beta$  maksimum şiddetli pikin radyan olarak yarı pik genişliği,  $\theta$  Bragg açısı ve  $\lambda$  kullanılan ışının dalga boyudur [22].

Üretilen numune için yapılan analiz sonucu elde edilen pikler, Bor Nitrür için  $P63/mmc$  uzay grubunda, Hegzagonal kristal kafes yapısında örgü sabiti  $a=b=2.504$ ,  $c=6.661$  nm

olarak hesaplanmış ve JCPDS 00-009-0012 kartı ile desteklenmiştir.

Üretilen BN numunenin kristal yapısı Şekil 1'de, bu yapının kristal özelliklerine ait  $2\theta$  açıları, düzlemlerin Miller İndisleri ve düzlemler arası mesafelerine ait değerler ise Tablo 1'de verilmiştir.

Şekil 1'de üretilen h-BN numunesine ait x-ışını kırınım deseni görülmektedir. Numunenin kırınım spektrumu incelendiğinde, hazırlanan nano yapı h-BN numunesinin polikristal yapıda olduğu, pik şiddetleri ve genişlikleri arasında ise farklılıkların olduğu görülmektedir. Şiddetleri büyük ve genişlikleri dar olan piklerde kristalleşmenin iyi, şiddetleri küçük ve genişlikleri büyük olan piklerde ise kristalleşmenin iyi olmadığı görülmektedir.

h-BN numunesindeki kristal atomları (002), (100) ve (101) düzlemlerinde tercihli yönelime sahiptir. Ancak en yüksek pik şiddeti (002) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yönelimi daha baskındır. En yüksek pik şiddetine

sahip olan  $2\theta=26,771^\circ$  deki (002) düzlemine ait düzlemler arası mesafe  $d=0,3327$  nm, maksimum pikin yarı pik genişliği (FWHM) ise 1,316 olarak ölçülmüştür. Bu değer Radyan cinsinden karşılığı yardımıyla Debye-Scherrer formülünden kristal boyutu 71,2 nm olarak hesaplanmıştır.

### 3.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları

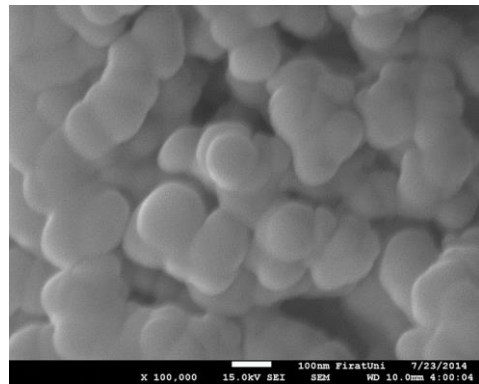
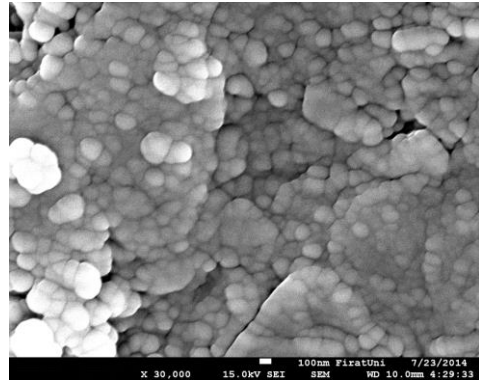
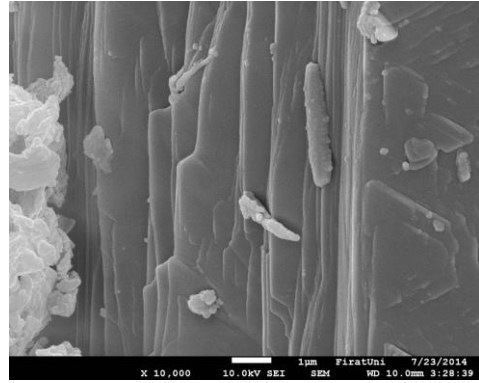
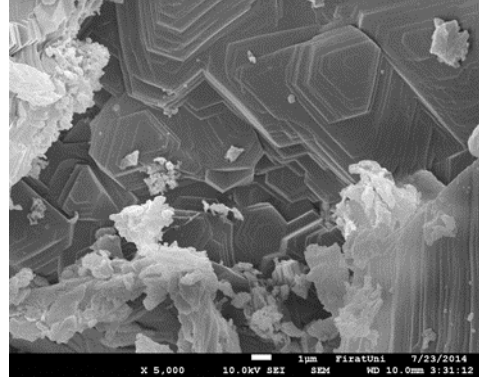
Üretilen h-BN numune için 5000X, 10.000X, 30.000X ve 100.000X büyütme oranlarında alınan SEM fotoğrafları Şekil 2(a, b, c, d)' de verilmiştir.

Şekil 2'de gösterilen SEM resimlerinde, çok sayıda hegzagonal yapıya sahip BN'ler yer aldığı görülmektedir. Bunlar üst üste binmiş eş eksenli homojen dağılımlı altıgen levhalar şeklindedir. Boyut olarak değişkenlik göstermektedir. Düşük büyütmelerde ortalama  $1\mu\text{m}$  den başlayan altıgen levha boyutları  $10\mu\text{m}$ ' ye kadar ulaşmaktadır. Levhaların birbiri üzerine tabakalı olarak bağlandığı ve oluşan her bir BN tabakasının birden çok BN nano taneden oluştuğu yüksek büyütmedeki SEM resimlerinde açıkça görülmektedir.

Yüksek büyütmelerde alınan fotoğraflardan ortalama tane boyutu 74 ile 112 nm aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Bu ise üretilen h-BN numunenin her ne kadar büyük boyutlu hegzagonal tabakalardan oluştuğu izlenimi bıraksa da aslında yapının nano boyutta olduğunu ve nanoboyutlu tanelerin bir araya gelerek büyük boyutlu taneleri oluşturduğunu açıklamaktadır. Elde edilen SEM görüntüleri, XRD sonuçları yardımıyla hesaplanan kristal boyutu ile uyum göstererek nano boyutlu toz üretildiği sonucunu doğrulamaktadır. Bulunan bu sonuçlar, literatür ile birebir uyum göstermektedir [27].

### 3.3. Fourier transform IR (FT-IR) spektroskopisi sonuçları

Hidrotermal metot ile sentezlenen h-BN nano tozlarının FT-IR analizi, hem reaksiyon işleminin kontrolü için hem de elde edilen yeni malzemelerin kimyasal özelliklerinin belirlenmesinde büyük önem arz etmektedir.

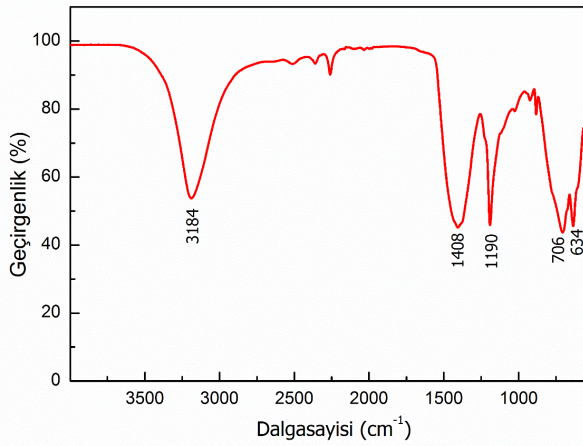


Şekil 2. Üretilen h-BN numuneye ait farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri.



Bu sebepten dolayı, numunedeki atomlar arası kimyasal bağlanmayı araştırmak için FT-IR spektroskopisi uygulanmıştır. FT-IR ölçümleri 500 ile 4000  $\text{cm}^{-1}$  dalgasayısı aralığında alınmıştır. Elde edilen veriler literatür ışığında doğrulanmıştır. h-BN numunesine ait FT-IR spektrumu Şekil 3'te gösterilmektedir.

FT-IR analizleri sonucunda; h-BN piklerinin literatürde elde edilen piklere benzer davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Şekil 3'de görüldüğü gibi, numunenin FT-IR spektrumunda h-BN' e ait iki kuvvetli karakteristik pik tespit edilmiştir. Bunlardan, 1408  $\text{cm}^{-1}$  dalga sayısında görülen pik BN' nin düzlem içi B-N gerilme titreşimine, 706  $\text{cm}^{-1}$ ' deki pik ise BN' nin sahip olduğu düzlem dışı B-N-B eğilme titreşimidir.



Şekil 3. Hidrotermal metot ile sentezlenen h-BN numunesine ait FT-IR spektrumu.

Yaklaşık olarak 3184  $\text{cm}^{-1}$ ' deki pik numunenin havadan aldığı nem sebebiyle oluşan O-H gerilme titreşimini göstermektedir. Yukarıda verilen h-BN numunesine ait FT-IR spektrumu sonuçları, XRD sonuçları ve literatürde tespit edilen sonuçlarla uyum içerisinde.

### 3.4. Optik karakterizasyon sonuçları

Hidrotermal metot yardımıyla sentezlenen h-BN numunenin oda sıcaklığındaki yansımaya spektrumu 200-1200 nm tarama bölgesinde UV-VIS-NIR spektrofotometre cihazıyla alınmıştır. Numunenin yasak enerji aralığının belirlenmesinde optik absorpsiyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde elde edilen reflektans eğrisi Kubelka-Munk [23] denklemi

yardımıyla absorpsiyon spektrumuna dönüştürülmüştür.

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (2)$$

Denklem 1'de verilen,  $R$  diffuse reflektans,  $F(R)$  ise Kubelka-Munk fonksiyonudur. Numune kalınlığı yardımıyla numunenin  $h\nu$ 'ye karşı  $(\alpha h\nu)^{1/n}$  grafiği çizilmiştir. Grafiğin lineer olduğu kısma karşı gelen doğrunun  $h\nu$  eksenini  $(\alpha h\nu)^n = 0$ 'da kestiği noktanın enerji değeri o materyalin yasak enerji aralığı değerini verir.  $n$  değeri 2 ise materyal dolaylı band aralığına sahiptir,  $n$  değeri  $\frac{1}{2}$  ise materyal doğrudan band aralığına sahiptir. Elde edilen grafiklerde  $n$  yerine  $\frac{1}{2}$  konulduğunda en iyi lineerlik belirlenmiştir. Böylece numunenin doğrudan band geçişine sahip olduğu belirlenmiştir. Yasak enerji aralığının hesaplanmasında [24] ;

$$(\alpha h\nu) = A \cdot (h\nu - E_g)^n \quad (3)$$

formülü kullanılmıştır. Denklem 3' e göre ;

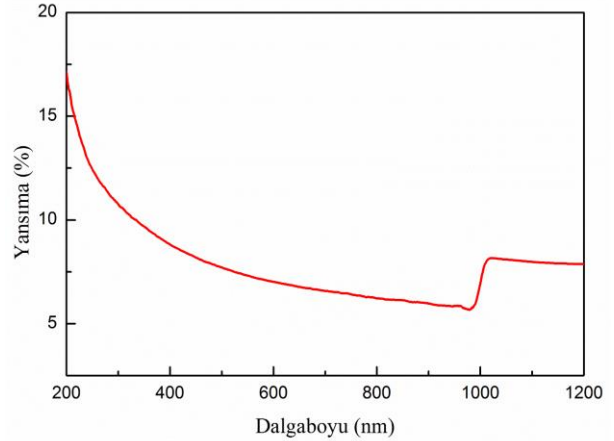
$\alpha$  = soğurma katsayısı

$h\nu$  = foton enerjisi

$E_g$  = Yasak Enerji Aralığı

$n = \frac{1}{2}$  (direkt geçişler için)

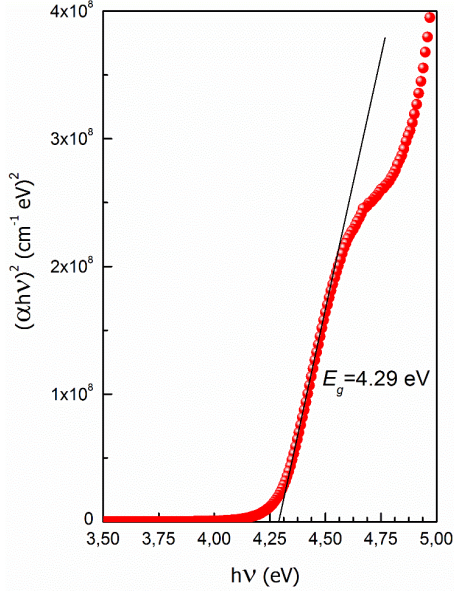
$A$  = sabit' dir.



Şekil 4. h-BN numunesinin yansımaya spektrumu.

Hidrotermal metotla hazırlanan h-BN numuneye ait oda sıcaklığında elde edilen optik yansımaya spektrumu Şekil 4' te görülmektedir. Spektrumdan görüldüğü üzere, numunenin yansımaya eğrisi, dalgaboyu arttıkça optik yansımının azaldığını, kısa dalga boylarına kaydıkça arttığını göstermektedir. Bu durumun,

fotonların enerjisinin azalmasından dolayı, fotonların elektronlar, atomlar veya kristal molekülleriyle daha az etkileşmesi ve geri yansımının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5. h-BN numunesine ait  $(\alpha hv)^2 - hv$  grafiği

Hazırlanan h-BN numunesine ait  $(\alpha hv)^2 - E$  grafiği Şekil 5'te gösterilmiştir. Elde edilen grafiğin lineer kısmının x eksenini kestiği nokta bulunarak, nano yapıdaki numunenin yasak enerji aralığı hesaplanmış ve  $E_g=4.29$  eV olarak bulunmuştur. Hesaplanmış olan  $E_g$  değeri literatürle birebir uyum göstermektedir[25].

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, başlangıç maddesi olarak kullanılan borik asitten bor oksit tozu elde edilmiş ve elde edilen bu tozun nitrülenmesinden sonra, şekillendirilerek sinterlenmesi sonucu nano boyutlu h-BN üretilmiştir. Bu sentezde, nitrüleme sıcaklığı ve gaz akış hızı h-BN eldesi üzerinde etkili olmuştur. Üretilen numunenin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen veriler ışığında, birçok özelliği bir arada bulundurması nedeniyle kullanımının her geçen gün arttığı BN ve bor nitrür esaslı ürünlerin ucuz ve kolay bir şekilde üretilbildiği görülmüştür. Sonuç olarak bu çalışma, ülkemiz bor kaynakları ve önemi göz önünde

bulundurulduğunda son yıllardaki ileri teknoloji seramiklerinin gelişmesine ve tamamen dışarıya bağımlılıktan kurtulmanın önünü açacağından büyük öneme sahiptir.

#### 5. Kaynaklar

1. Niedenzu K., (1965). Boron- Nitrogen Compounds, Academic Pres. Inc., *Springer Verlag*, 147-153.
2. Brotherton R.J., (1970). *Progress in Boron Chemistry*, Pergamon Press, California, **2**: 211-311.
3. Pease R. S., (1952). An X-ray Study of Boron Nitride, *Acta Crystall*, **5**: 356- 361.
4. Dreissig D. H., (2002). Synthesis of BN Powders, Doktora tezi, Chemistry Dep. of The University of New Mexico, 295.
5. Materials Handbook for Refractories, (2002). Traditional & Advanced Ceramics, *Ceramic Industry*, January, 26-136.
6. Gmelins Handbook of Inorganic Chemistry, (1988). Boron Compounds BN Special Issue, 8th edition, *Springer Verlag*, 1 -89.
7. Lide B. D. R., (1995). *CRC Handbook of Chemistry and Physics, Student Edition*, 76 th Edition, CRC Press.
8. Geçkinli E., (1992). İleri Teknoloji Malzemeleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi, Sayı: 1454, Teknik Üniversite Matbaası, 126-127.
9. Kawasaki Steel Corporation, (1987). Hexagonal boron nitride having a reduced content of water soluble boron- containing impurities, and process for its production, *European Patent Application*, **7**: 1- 14.
10. Paine R. T. ve Pruss E., (2000). Spherical Boron Nitride Process, System, and Product of Manufacture, *European Patent Application*, EP 1053973 A1: 1- 17.
11. Hagiwara H., Tanji H. ve Tamaki S., (1986). Inorganic Synthetics Containing Boron (BN, B<sub>4</sub>C, LaB<sub>6</sub>) and Their Application, *Ceramic Data Book, Gordon and Beach Science Publisher*, 201- 213.
12. Rudolph S., (2002). Materials Review: Boron Nitride, *American Ceramic Society Bulletin*, August , 81, **8**: 34 -35.
13. Paine R. ve Narula C. K., (1990). 'Synthetic Poutes to Boron Nitride', *Chem. Rev.*, **90**: 73 -91.
14. Lipp A., Shwetz K. A. ve Hunold K., 'Hegzagonal Boron Nitride: (1989). Fabrication, Properties and Applications, *Journal of European Ceramic Society*, **5**: 3-9.
15. Kempfer L., (1990). The Many Faces of Boron Nitride, *Industrial Ceramics*, **3**: 41- 44.

16. Kimura Y., Wakabayashi T., Okada K. Wada T. ve Nishikawa H., (1999). Boron Nitride as a Lubricant Additive, *Wear*, **232**: 199- 206.
17. Saito T. ve Honda F., (2000). Chemical Contribution to Friction Behaviour of Sintered Hexagonal Boron Nitride in Water, *Wear*, **237**: 253 -260.
18. Osborne T. W., (1991). New Application for Boron Nitride Coatings, *Ceramic Industry*, **09**: 55-57.
19. Lelonis D. A., (2003). Boron Nitride Powder- A High Performance Alternative for Solid Lubricants, *GE Advanced Ceramics Teknik Notlari*.
20. Gu, Y.L., Zheng, M.T., Liu, Y.L., Xu, Z.L., (2007). Synthesis and characterization of boron nitride sponges as a novel support for metal nanoparticles, *Journal American Ceramic Soc.*, **90**: 1589–1591.
21. Mendelovici, E., Frost, R.L., Kloprogge, J.T., (2001). Modification of chrysotile surface by organosilanes: An IR- Phoacoustic spectroscopy study, *Journal of Colloid Interface Science*, **238** (2): 273–278.
22. Aydın C., El-Nasser H.M., Yakuphanoglu F., Yahia I.S., A ksoy M., (2011). Nanopowder synthesis of aluminum doped cadmium oxide via sol–gel calcination processing, *Journal of Alloys and Compounds*, **509**: 854–858.
23. Aydın C., Abd El-sadek M.S., Zheng K., Yahia I.S., Yakuphanoglu F., (2013). *Optics and Laser Technology*, **48**: 447–452.
24. Aydın H., Tataroglu A., Al-Ghamdi Ahmed A., Yakuphanoglu F., El-Tantawy Farid, Farooq W.A., (2015). A novel type heterojunction photodiodes formed junctions of Au/LiZnSnO and LiZnSnO/p-Si in series, *Journal of Alloys and Compounds*, **625**: 18-25
25. Ram S. S. Al. (2014). Band gap effects of hexagonal boron nitride using oxygen plasma” *Appl. Phys. Lett.* 104, 163101 *Surface Science*, **350**: 109-114.
26. Aydın C. (2010). Metal oksit katkılı yarı iletken malzemelerin üretilmesi ve karakterizasyonu, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü *Yüksek Lisans tezi*, 29.
27. Kimiyasu S., Hitomi H., Takashi S., Yuji H., Hiromi N., Hideaki N., Kenshi M., Koji W. (2010) Thermally conductive composite films of hexagonal boron nitride and polyimide with affinity-enhanced interfaces, *Journal of Materials Chemistry*, **20**: 2749-2752



## Merkezi Örüntü Üreteçlerinin Robotlarda Hareket Kontrolü için Çeşitli Uygulamaları: Bir Araştırma

Deniz KORKMAZ, Gonca ÖZMEN KOCA\*, Cafer BAL

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23119, Türkiye

\*gonca.ozmen@gmail.com

(Geliş/Received: 06.06.2018; Kabul/Accepted: 11.09.2018)

### Özet

Bu çalışmada, hızla gelişen robotik uygulamalarında sıklıkla kullanılan Merkezi Örüntü Üreteci (MÖÜ) yapıları ve bu yapılar ile robotların akıllı hareket kontrolü üzerine son 20 yılda ortaya çıkan gelişmeler detaylı bir şekilde incelenmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar ile ilgili bir ön değerlendirme sunulmuştur. Literatürde yer alan MÖÜ kontrol modelleri ve buna bağlı farklı yapılar, tasarım ve uygulama kolaylığı dahil olmak üzere, modellerin göreceli avantajları ve dezavantajlarına odaklanarak gözden geçirilmiştir. Biyolojik bir sinir ağı görevi gören MÖÜ'ler, herhangi bir geri besleme veya giriş sinyaline ihtiyaç duymadan sürekli salınımlı, dayanıklı ve ritmik çıkışlar üretebilir. Robotik mühendisliği çalışmalarındaki temel fikir, çok eklemlili veya çok serbestlik dereceli robotların verimli ve dayanıklı bir şekilde hareketlerinin koordinasyonunu sağlamaktır. MÖÜ tabanlı kontrolör tasarımında ve uygulamasında olası alternatiflerden kaynaklanan temel konular, farklı hareket kontrol yöntemleri ve uygulamalarına ilişkin incelemeler sunulmuştur. Bu alanda kullanılan yöntemler uygulanan robot sınıflandırmaları ile birlikte özetlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Merkezi Örüntü Üreteci, Robot Uygulamaları, Akıllı Hareket Kontrolü, Biyomimetik Kontrol, Sinir Ağları

## Various Applications of Central Pattern Generators for Locomotion Control in Robots: A Review

### Abstract

In this study, Central Pattern Generator (CPG) structures which are frequently used in developing robotic applications and the developments occurred over the past 20 years on intelligent motion control of robots with these structures are examined in detail and a preliminary evaluation about the future works are presented. CPG control structures in the literature and different structures depended on these models are reviewed focusing on the notional advantages and disadvantages of these models with ease of design and application. CPGs acting as a biological neural network can generate continuous oscillatory, robust and rhythmic outputs without any feedback or input signal. The basic idea of robotic engineering studies are to provide efficient and robust locomotion coordination of multi-joint or multi-degrees-of-freedom robots. Fundamental issues arising from possible alternatives in CPG-based controller design and application, different locomotion control methods and their applications are presented. The methods used in this area are summarized together with the applied robot classifications.

**Keywords:** Central Pattern Generator, Robotic Applications, Intelligent Locomotion Control, Biomimetic Control, Neural Networks

### 1. Giriş

Biyomimetik tasarım ve uygulamaları, tabiattan esinlenerek geliştirilen teknolojiler ile oldukça popüler bir hale gelmiştir. Biyomimetik, canlı formların incelenmesi ve bu yapıların farklı mühendislik uygulamalarına aktarılması olarak adlandırılır. Biyomimetik tasarımın temel amacı, tabiattaki canlıları taklit ederek mühendislik problemlerine farklı ve yenilikçi çözümler

getirmek veya var olan sistemlerin performanslarını iyileştirmektir. Günümüzde; robotik sistemler, yapay zeka uygulamaları, eniyileme, nano teknoloji, mimari tasarımlar, savunma sistemleri ve sağlık gibi birçok farklı alanda bu yaklaşımdan faydalanılmaktadır [1-4].

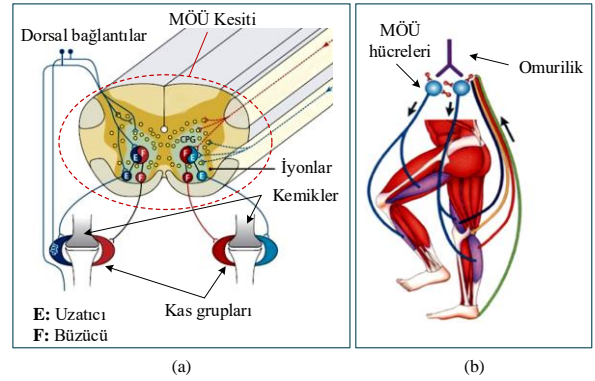
Özellikle biyomimetik tasarım yaklaşımının robotik sistemlere adapte edilmesi, son yıllarda araştırmacıları canlıların ritmik hareketlerinin nasıl ve nerede üretildiği ile ilgili araştırmalara

yönlendirmiştir. Canlıların hareketlerinin vücudun herhangi bir noktasının uyarılmasına tepki olarak omuriliğin refleks bağlarının verdiği cevaplar ile oluşturulduğu düşüncesi yaklaşık 1900'lü yıllara kadar sürmüştür. Yürüme eylemi gerçekleştiren bir canlının, ayağı yere basarken teması ile bir hareket döngüsünün başladığı ve aynı ayak tekrar yere temas ettiğinde ise yeni bir ardışık hareketin tekrar ettiği kabul edilmiştir. Böylece ayağın zemin ile teması sonucunda meydana gelen basıncın duyuşal uyarıcıları tetiklediği ve bu hareketlerin uyarıcılara göre oluştuğu düşünülmüştür [5]. Ancak bu yaklaşım 1900'lü yılların başında bir köpeğin havada asılı durduğu anda bacaklarını yürümeyi andıran şekilde hareket ettirmesi deneyi ile değişmeye başlamıştır [5-7]. Ayrıca, Sherrington [5] tarafından köpek ve kedilerin tüm duyu sinirlerinin kopmasına rağmen yürüyebildikleri gözlemlenmiştir. Brown [5] ise bu hareketlerin derilerindeki uyarıcılara karşı bir tepki olmadığını ispatlamıştır. Bununla birlikte, Shik ve arkadaşları [7] bir kedinin yürüme hareketlerini gözlemlemiş ve bu hareketlerin devamlılığının beyin sapının elektriksel uyarıcılar ile tetiklenmesinden kaynaklandığını bulmuşlardır.

Tüm bu araştırmalar, canlılarda hareketlerin omurilik veya beyin sapı ile gerçekleştiğini ve beyin merkezinden yalnızca basit uyarıcıların geldiğini ispatlamıştır [5-9]. Bu durum diğer canlıların çoğu için de zamanla kabul görmüştür [10]. Lokomotor hareketlerin yüksek beyin merkezinden veya duyuşal alıcılardan herhangi bir uyarı gelmeden omuriliğin literatürde Merkezi Örüntü Üreteci (MÖÜ, Central Pattern Generator, CPG) olarak adlandırılan sinir hücreleri ile oluşturulabileceği gösterilmiştir. Bir MÖÜ devresi geri besleme bilgisine ihtiyaç duymadan canlının temel hareketlerini üretebilen, ritmik ve salınımlı sinyaller oluşturan biyolojik sinirsel bir yapıdır [5-14]. MÖÜ'yü oluşturan sinir hücreleri omurilik ile beraber beyin sapında da bulunabilir. Farklı türlerdeki canlılarda MÖÜ'lerin birbirleriyle olan bağlantıları farklılık gösterebilir [5,10,11].

MÖÜ devreleri motor korteksten gelen bağlantılar ile kontrol edilmektedir. Bu bağlantılar doğrudan veya beyin sapı aracılığı ile gerçekleşir [7]. Sinirsel bir MÖÜ devresi en basit haliyle birbirine bağlı iki adet ara sinir hücresinden oluşur. Sinaps adı verilen bu

bağlantılar elektriksel iletimler ile gerçekleşir. Sinapslar, sinir hücrelerinin aksiyon potansiyellerini değiştirerek elektriksel geçiş akımlarını oluşturur. Bu karşılıklı etkileşimler çıkışların genliğini ve çıkışlar arasındaki faz farkını belirler [5-7,9,15]. Sinirsel bir MÖÜ yapısının en önemli özelliği herhangi bir dış uyarıcı olmadan davranış tabanlı hareketleri içeren ritmik ve sürekli salınımlı çıkışlar üretebilmesidir. MÖÜ'lerin bir araya gelmesiyle hiyerarşik bir bütün oluşturularak canlının hareket etme fonksiyonları gerçekleştirilir. Aynı zamanda, uygun yapıya sahip bir MÖÜ devresi beyin merkezinden gelen sinyaller ile nöromodülasyon ve duyuşal geri besleme özelliğine de sahip olabilir [5,6,9-11]. Şekil 1'de nörobiyolojik bir MÖÜ yapısının kesiti ve kaslarla olan ilişkisi sunulmuştur.



Şekil 1. Nörobiyolojik MÖÜ yapısının gösterimi: (a) Kesiti, (b) Kaslarla olan ilişkisi

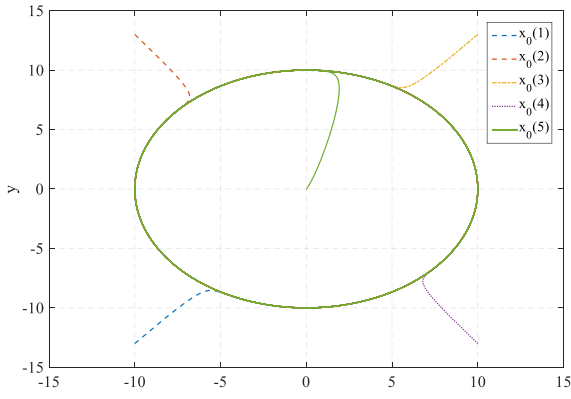
Bu çalışmada, son yıllarda gelişen teknoloji ile beraber robotik uygulamalarında sıklıkla kullanılan MÖÜ yapıları ve bu akıllı kontrol yapılarının robotlar üzerine uygulamaları detaylı bir şekilde incelenmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar ile ilgili bir ön değerlendirme sunulmuştur. Literatürde en çok kullanılan MÖÜ yapıları seviyelerine ayrılarak farklı kriterlere göre sınıflandırılmış ve buna bağlı yapılar ve uygulamaları avantajları ve dezavantajlarına odaklanarak gözden geçirilmiştir.

Bu çalışma aşağıdaki gibi organize edilmiştir: 2. Bölümde en çok kullanılan MÖÜ osilatör yapıları tanıtılmıştır. 3. Bölümde bu MÖÜ yapılarının seviyelerine, hesaplama karmaşıklığına ve parametrelerinin belirlenmesine göre bir karşılaştırma yapılmıştır. Farklı kriterlere göre MÖÜ'ler ile ilgili robot

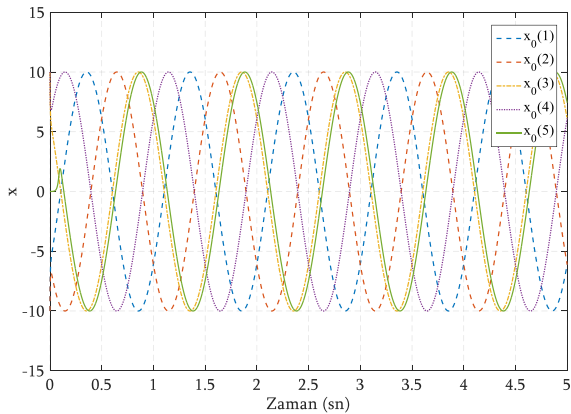
uygulamaları 4. Bölümde verilmiştir. 5. Bölümde sonuçlar değerlendirilmiş ve bazı öneriler sunulmuştur.

## 2. MÖÜ Osilatör Yapıları

Canlıların uçma, yüzme, atlama, yürüme, koşma, emikleme ve sürünme gibi temel hareketleri MÖÜ hücre yapıları ile sağlanmaktadır. Bununla birlikte; solunum, emme, yalama ve çiğneme gibi ritmik fonksiyonlar da MÖÜ hücreleri ile sağlanabilir [10,11,16]. MÖÜ'ler, bu temel görevleri yerine getirirken dış ortamdan gelen bozucu girişlere karşı belirgin tepkiler üreterek ritmik davranışların kaldığı yerden istenilen şekilde devam etmesini sağlayabilirler [10,13,17,18]. Böylece, hangi başlangıç noktasından başlarsa başlasın MÖÜ çıkış cevabı aynı limit çevrim içinde kalmaktadır. Şekil 2'de, Hopf MÖÜ yapısı için limit çevrim gösterilmiştir. Şekil 3'de ise dış ortamdan gelen bozucu girişe karşı Hopf osilatörün davranışı verilmiştir.

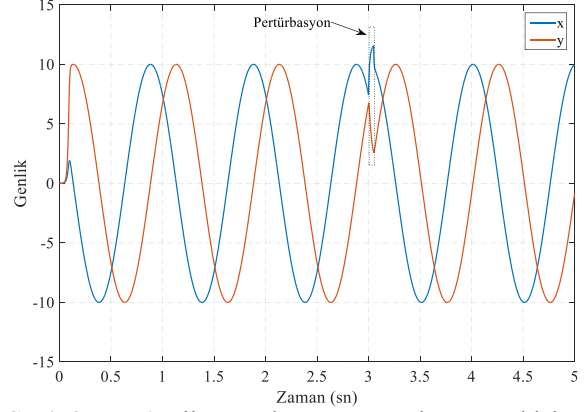


(a)



(b)

**Şekil 2.** Örnek Hopf MÖÜ davranışı: (a) Farklı başlangıç değerleri için limit çevrimler, (b) Farklı başlangıç değerlerine bağlı çıkışlar



**Şekil 3.** Hopf osilatörün bozucu pertürbasyon etkisine göre davranışı

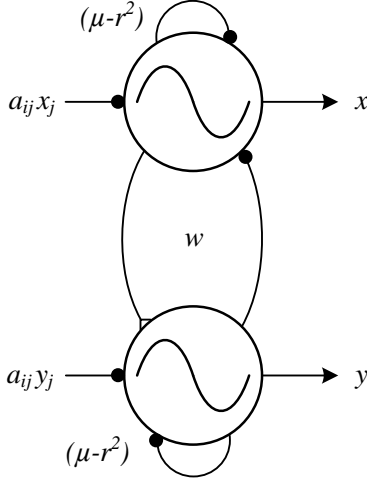
Çok eklemlü/uzuvlu robotların hareket kontrolü için geliştirilen MÖÜ yapıları nörobiyolojik ve tasarım şekilleri dikkate alınarak biyofiziksel, ilişkisel ve soyut model olmak üzere üç temel seviyede sınıflandırılabilir. Biyofiziksel modeller genel olarak iyon yüklerinin özelliklerini taşıyan ve hücre zar potansiyellerini taklit edebilen ritmik çıkışlar üretirler. İlişkisel modeller ise ara sinir hücreleri ve uyarıcı/engelleme sinaptik etkileşimler ile çıkış sinyalinin üretilmesini sağlarlar. Soyut modeller diğer MÖÜ yapılarına göre farklılık gösterir. Bu modeller temel osilatör yapılarının matematiksel ifadeleri ile tanımlanır ve bu yapıların kuplajlanması ile oluşturulur [8,10,11].

Bu bölümün devamında, literatürde en çok kullanılan MÖÜ yapıları; Hopf, Genlik Denetimli Faz (GDF), Matsuoka, Herrero-Carron ve Ekeberg osilatörleri incelenmiş temel özelliklerine göre genel bir karşılaştırma yapılmıştır.

### 2.1. Hopf osilatörü

Soyut model özelliklerine sahip Hopf osilatörleri limit çevrim özellikleri sayesinde dışarıdan gelen bozuculara karşı salınımlı ritmik çıkışlar üretebilirler [19]. Şekil 4'de, kartezyen koordinat düzleminde verilen Hopf osilatör yapısı iki adet yarım merkezli hücre ile temsil edilmiştir. Bu osilatörler sürekli salınımlı sinüzoidal çıkışlar

üretmek istenilen genlik ve frekans değerine kolayca ulaşabilirler.



Şekil 4. Hopf osilatör yapısı

Hopf türü bir osilatör kartezyen koordinat düzleminde aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{x}_i = \gamma(\mu - r^2)x_i - w_i y_i - a_{ij} x_j \quad (1)$$

$$\dot{y}_i = \gamma(\mu - r^2)y_i + w_i x_i - a_{ij} y_j \quad (2)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

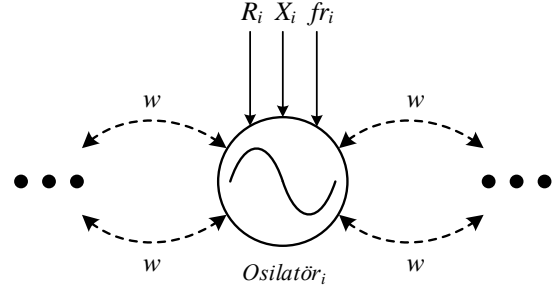
Burada  $i$  ve  $j$  osilatör indisleri olmak üzere,  $x_i$  ve  $y_i$  osilatörde bulunan hücre çıkışlarını,  $w_i$  çıkışın açısal frekansını,  $\mu$  çıkış genliğini,  $r$  çıkışların vektörel büyüklüğünü,  $a_{ij}$  osilatörler arasındaki kuplajları ve  $\gamma$  ise yakınsama hız sabitini gösterir.

Osilatörler arasında yapılan kuplaj bağlantıları harici bozucu etkilere sebep olmaktadır. Bu durum osilatörün faz dinamiklerinin etkilenmesine ve osilatörler arasındaki faz farkının sabit kalmamasına sebep olur. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için pertürbasyon etkisi olarak tanımlanan öğrenme ifadeleri kullanılır. Bu pertürasyon ifadelerinden en çok tercih edileni Hebbian türü öğrenmedir [18].

## 2.2. GDF osilatörü

1975 yılında Yoshiki Kuramoto tarafından geliştirilen Kuramoto osilatörlerinden

esinlenerek, Şekil 5’de verilen GDF osilatörleri tasarlanmıştır [4].



Şekil 5. GDF osilatör yapısı

$\dot{\theta}_i = w_i^{osc}$  ile ifade edilirse, kuplajlar ile bağlanan istenilen faz farkında eş zamanlı sinüzoidal çıkışlar üretebilen GDF osilatörleri aşağıdaki gibi tanımlanır [20]:

$$\dot{\phi}_i = 2\pi f r_i + \sum_j w_{ij} \sin(\phi_j - \phi_i - \varphi_{ij}) \quad (4)$$

$$\dot{r}_i = a_r \left( \frac{a_r}{4} (R_i - r_i) - \dot{r}_i \right) \quad (5)$$

$$\dot{x}_i = a_x \left( \frac{a_x}{4} (X_i - x_i) - \dot{x}_i \right) \quad (6)$$

$$\theta_i = x_i + r_i \cos(\phi_i) \quad (7)$$

Burada  $i$  ve  $j$  osilatör indisleri olmak üzere,  $\phi_i$  osilatör fazını,  $r_i$  genliği,  $x_i$  ofseti,  $\theta_i$  çıkışı ve  $\varphi_{ij}$  osilatörler arasındaki faz farkını gösterir.  $R_i$ ,  $X_i$  ve  $f r_i$  osilatörün giriş parametreleri ise sırasıyla içsel genlik, ofset ve frekansdır.  $a_r$  ile  $a_x$  osilatör çıkışlarının istenen parametre değerlerine yakınsama hızını belirleyen sabitlerdir.

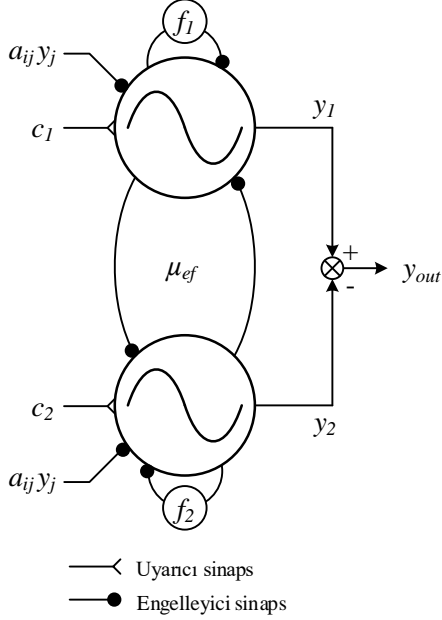
Soyut bir osilatör yapısına sahip GDF osilatörleri biyofiziksel özellikleri içermezler ve bu sebeple duyuşal geri beslemeli hücrelere sahip değildir.

## 2.3. Matsuoka osilatörü

İki adet yarım merkezli sinir hücresinden oluşan bu osilatör yapısı 1985 yılında Matsuoka tarafından geliştirilmiştir. Bu osilatör hücreleri birbirlerinin davranışını durdurmaya yönelik



etkileşimler içinde bulunmaktadır. Bu etkileşimler engelleyici sinapslar ile gerçekleşir ve sonucunda osilatör çıkışında salınımlı sinyaller oluşur [21]. Şekil 6'da bir Matsuoka osilatör modeli verilmiştir.



Şekil 6. Matsuoka osilatör yapısı

Bu osilatör yapısında bulunan yarım merkezli sinir hücreleri uzatıcı ve büzücü kas hücrelerini temsil ederler ve her hücrenin zar potansiyeli yorgunluk etkisi olan adaptasyon derecesine bağlı olarak değişir. En temel haliyle bir Matsuoka osilatör yapısı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Tr \frac{dx_i}{dt} = -x_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} y_j - \mu_{ef} y_i - b_i f_i + c_i \quad (8)$$

$$Ta \frac{df_i}{dt} = -f_i + y_i^q \quad (9)$$

$$y_i = \max(0, x_i) \quad (10)$$

$$y_{out} = y_i - y_{i-1} \quad (11)$$

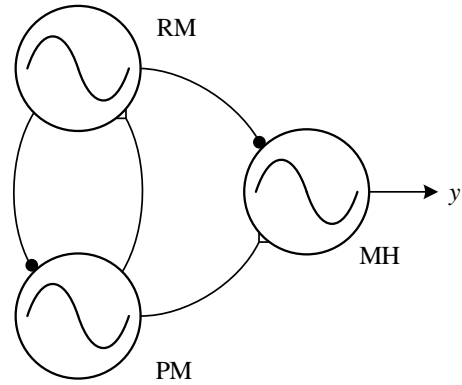
Burada  $i$  sinir hücresi indisi olmak üzere,  $x_i$  sinir hücresinin çıkışını,  $Tr$  ve  $Ta$  adaptasyon zaman sabitlerini,  $a_{ij}$  diğer osilatörler arasındaki bağlantıları,  $\mu_{ef}$  sinir hücreleri arasındaki

sinapsları,  $b_i$  adaptasyon ateşleme hız oranını,  $f_i$  adaptasyon derecesini,  $c_i$  harici tonik oranını,  $j$  osilatör indisini ve  $q$  adaptasyon etkisini gösterir.

Bu osilatör yapısında değerinin bulunması gereken birçok parametre vardır. Tonik oranı her hücre için genellikle eşit olarak belirlenir. Tonik oranının artması sinir hücresinin çıkışının da adaptasyon zaman sabitlerine bağlı olarak büyük oranda artmasına neden olur. Osilatör çıkışının frekansı ise adaptasyon ateşleme hızı ile doğru ve adaptasyon zaman sabitleri ile ters orantılı olarak değişir. Osilatörler arasındaki faz farkları sinapslar ile saptanır. Çıkış sinyalinin saf bir sinüzoidal olarak benzememesi bu osilatör yapısının en önemli dezavantajlarından biridir [22].

## 2.4. Herrero-Carron osilatörü

Rulkov osilatör yapısı geliştirilerek robotik uygulamalarda daha kullanılabilir bir osilatör olan Herrero-Carron yapısı oluşturulmuştur. Bu osilatör yapısı Şekil 7'de verilen ProMotor (PM), ReMotor (RM) ve Motor Hücre'den (MH) meydana gelir ve bu sinir hücreleri sinapslar ile birbirine bağlanarak MÖÜ çıkışı ritmik sinüzoidal şekil alır. Herrero-Carron osilatörü biyofiziksel seviyenin özelliklerini taşır ve biyolojik sinirsel aktivite davranışı gösterir [8].



Şekil 7. Herrero-Carron osilatör yapısı

Hücreler arası iyon akışının özelliklerini içeren bu osilatör modelinde MH dışındaki diğer hücreler aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{\alpha}{1-x} + y & x \leq 0 \\ \alpha + y & 0 \leq x < \alpha + y \\ -1 & \text{diğer} \end{cases} \quad (12)$$

$$x_{n+1} = f(x_n, y_n) \quad (13)$$

$$y_{n+1} = y_n - \mu(x_n + 1) + \mu\sigma + \mu I_n \quad (14)$$

$$I = gr(X_p - E_{syn}) \quad (15)$$

$$\dot{r} = \begin{cases} \lambda[T](1-r) - \beta r & t_f < t < t_f + t_r \\ -\beta r & \text{diğer} \end{cases} \quad (16)$$

Burada  $n$  hücre indisi ve  $\mu$  patlama sabiti olmak üzere  $x_n$  ve  $y_n$  sırasıyla  $\mu$ 'ye bağlı hızlı ve yavaş zar gerilimlerini,  $I_n$  diğer hücrelerden gelen akım miktarını,  $\alpha$  ve  $\sigma$  ise patlama süresi katsayısı ve periyodunu, gösterir.  $\lambda$ ,  $\beta$  ve  $g$  hücreler arasındaki sinapsları,  $t_f$  ve  $t_r$  ateşleme ve durma zaman sabitlerini,  $[T]$  kimyasal konsantrasyonu,  $X_p$  ve  $E_{syn}$  ise sırasıyla zar potansiyeli ile sinaptik sonrası hücre potansiyelini belirtir. MH hücre çıkışı için ise aşağıdaki eşik fonksiyonu kullanılır:

$$s(x, v) = \begin{cases} 1 & x > v \\ 0 & x \leq v \end{cases} \quad (17)$$

Burada  $s$  eşik fonksiyonu ve  $v$  eşik değerini tanımlar. Böylece, MH çıkışı;

$$\tau \dot{m} = -m + \gamma(s(x, v) - s(x, v)) \quad (18)$$

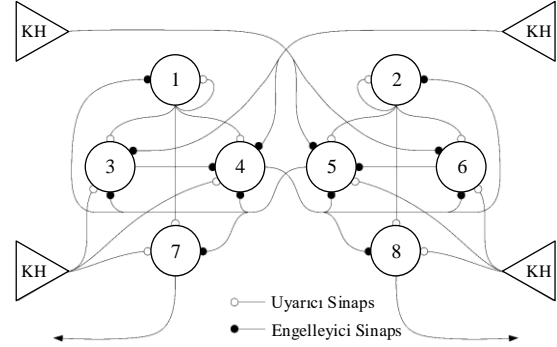
olarak tanımlanır.  $m$  MH'nin zar potansiyeli olmak üzere  $\gamma$  içsel genliği ve  $\tau$  zar potansiyeli zaman sabitini gösterir.

Herrero-Carron osilatör yapısı zengin içsel dinamikler içerir ve biyolojik MÖÜ'lerin birçok özelliğine sahiptir. Bu MÖÜ'nün dezavantajı oldukça karmaşık yapısından dolayı osilatör tasarımının ve uygulanabilirliğinin zorlaşmasıdır.

## 2.5. Ekeberg osilatörü

Ekeberg osilatör yapısı Lamprey türü balıkların MÖÜ'lerinden esinlenerek

geliştirilmiştir ve ilişkisel model özelliklerine sahiptir. Şekil 8'de osilatör yapısına ait blok şema verilmiştir. Osilatör davranışı temel olarak sinir hücrelerinin uyarıcı ve engelleyici sinaptik bağlantılarına bağlıdır [23]. Bu yapıda geri beslemeli duyuusal sinir hücreleri olan Kenar Sinir hücreleri (KS) ve ara sinir hücreleri bulunmaktadır.



Şekil 8. Ekeberg osilatör yapısı

Her sinir hücresi bir Sızdıran Topla Ateşle (STA) hücre modeli ile aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{\zeta}_+ = \frac{1}{T_D} \left( \sum_{i \in \psi_+} u_i w_i - \zeta_+ \right) \quad (19)$$

$$\dot{\zeta}_- = \frac{1}{T_D} \left( \sum_{i \in \psi_-} u_i w_i - \zeta_- \right) \quad (20)$$

$$\dot{g} = \frac{1}{T_A} (u - g) \quad (21)$$

$$u = \begin{cases} 1 - e^{-(\theta - \zeta_+) \Gamma} - \zeta_- - \mu g & u > 0 \\ 0 & u \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

Burada  $i$  ara sinir hücresi indisini,  $\zeta_+$  ve  $\zeta_-$  sırasıyla uyarıcı ve engelleyici gecikmiş sinapsları,  $T_D$  ve  $T_A$  zaman sabitlerini,  $u_i$  hücre çıkışını,  $w_i$  sinir hücreleri arasındaki sinapsları,  $\psi_+$  ve  $\psi_-$  sırasıyla diğer osilatörlerden gelen uyarıcı ve engelleyici sinapsları,  $g$  ise osilatör çıkışını verir.  $\theta$ ,  $\mu$  ve  $\Gamma$  ise osilatöre ait eşik, kazanç ve adaptasyon oranı sabitlerini temsil eder.

Bu yapıdaki her sinir hücresinin dinamik davranışını tanımlamak için kullanılan matematiksel ifadeler osilatör yapısını daha

karmaşık hale getirmektedir. Bu durum uygulamadaki kullanılabilirliğini azaltmaktadır.

### 3. Osilatör Yapılarının Karşılaştırılması

Yukarıda bahsedilen MÖÜ yapıları için hesaplama karmaşıklığı, parametrelerin belirlenmesi ve duysal geri besleme olmak üzere üç farklı kriter belirlenerek bu yapıların genel bir karşılaştırılması yapılmıştır ve bu karşılaştırma Tablo 1’de verilmiştir. Kriterler için hesaplama karmaşıklığında düşük, orta ve fazla; parametrelerin belirlenmesinde kolay, orta ve zor; duysal geri besleme özelliğinde ise zayıf, orta ve iyi seviyeleri belirlenmiştir.

Biyofiziksel MÖÜ yapıları yüksek hesaplama karmaşıklığı ve parametre değişimlerinin zor olması yanında bir canlının

biyolojik MÖÜ yapısının temel özelliklerini koruma ve sinirsel faaliyetlerin zengin dinamiğine sahip olma özelliğini barındırırlar. İlişkisel MÖÜ’ler biyofiziksel modellere göre bir alt seviyede bulunurlar. Bu yapıların sinirsel hücre aktiviteleri biyofiziksel MÖÜ yapıları kadar detaylı olmasa da canlıların sinirsel MÖÜ özelliklerine sahiptir. İlişkisel modellere duysal geri besleme özelliğini eklemek mümkündür. Ancak, bazı parametre değerlerinin ayarlanması oldukça zordur. Soyut seviyedeki MÖÜ yapılarında ise parametre değişiminin kolay olmasının yanında hesaplama karmaşıklığı düşüktür ve duysal geri besleme özelliğinin hücre bazında eklenmesi mümkün değildir. Bu yapılarda duysal sinir hücreleri yerine sabit parametreler veya fonksiyonlar tanımlanır [8].

**Tablo 1.** MÖÜ osilatör yapılarının karşılaştırılması

MÖÜ Yapısı	Sınıfı	Hesaplama Karmaşıklığı	Parametrelerin Belirlenmesi	Duysal Geri Besleme Özelliği
Matsuoka	İlişkisel	Orta	Zor	Zayıf
GDF	Soyut	Düşük	Kolay	Zayıf
Hopf	Soyut	Orta	Orta	Zayıf
Ekeberg	İlişkisel	Orta	Orta	Orta
Herrero-Carron	Biyofiziksel	Fazla	Zor	İyi

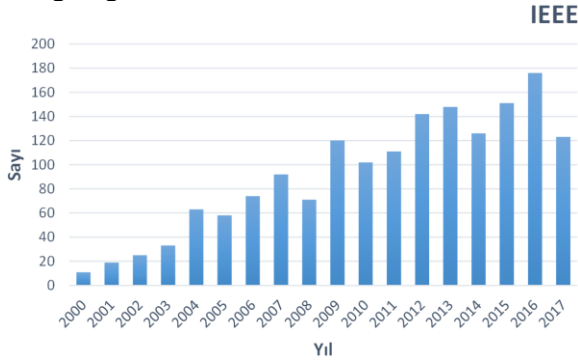
Düşük hesaplama karmaşıklığına, parametrelerin kolay belirlenmesine ve duysal geri besleme özelliğine sahip bir MÖÜ yapısının yukarıda yapılan karşılaştırma sonucunda tam olarak bulunmadığı görülmüştür. MÖÜ yapılarının farklı uygulamalar için avantajları arttırılmaya çalışıldıkça bazı dezavantajlar da beraberinde gelmektedir. Doğru bir MÖÜ yapısını belirlemek için en önemli etken uygulamadaki robot prototipinin nasıl bir yapıya ihtiyacı olduğuna karar verilmesidir. Bununla birlikte, uygulamadaki kullanılabilirliğin arttırılması da seçilecek MÖÜ yapısı için önemli bir etkidir.

### 4. Robotikte MÖÜ Yapıları

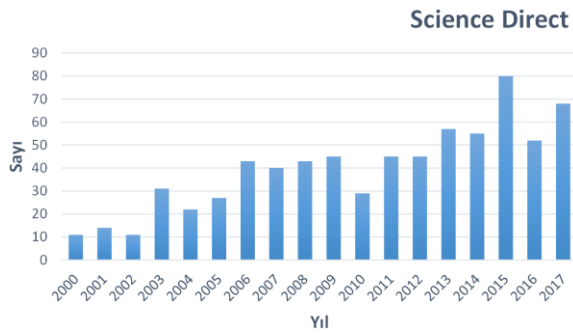
Literatürde, yapay MÖÜ modelleri geliştirerek doğadaki canlıların ritmik hareketlerini ve biyomimetik kontrol yapılarını mühendislik alanlarındaki uygulamalara aktaran

ve bu yapıların sürekli durumdaki performanslarını iyileştirmeye yönelik birçok çalışma yapılmaya başlanmıştır [1,15,24–29]. Özellikle, birden fazla ekleme sahip bir robotun her bir eklemine gerçek bir canlının kaslarındaki eşzamanlı ve doğrusal olmayan hareket özelliklerinin kazandırılması önemli bir konu haline gelmiştir [10]. Bu amaçla; MÖÜ yapısının konum, kuvvet, moment, kas uzunluğu, hareket hızı ve frekansı gibi farklı fiziksel özelliklere bağlı davranışları kolayca üretebilmesi ve bozucu girişlere karşı bu davranışları koruyabilmesi gerekmektedir. Böylece robotik sistemin etkin bir hareket kabiliyetine sahip olması sağlanabilir. Bu sebeple, MÖÜ tabanlı kontrol yöntemleri dinamiği değişen, salımlı ve lokomotor davranışlar için tek başına veya farklı kontrol yöntemleriyle beraber sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Sonuç olarak, yukarıda bahsedilen özellikler yeni nesil kontrol sistemleri için sinirsel bir MÖÜ devresini oldukça popüler hale

getirmiştir. Bu MÖÜ devreleri birçok farklı robot ve mühendislik sistemleri için kararlı, uygulanabilir, uyarlanabilir ve hiyerarşik kontrol çözümleri sunmaktadır [2,11,15,21,29–33]. Şekil 9’da, IEEE ve Science Direct veri tabanlarında “Central Pattern Generator” veya “CPG” ve “Robot” anahtar kelimeleri birlikte kullanılarak 2000 yılından günümüze kadar yapılan yayınların istatistiksel analizleri verilmiştir. Her iki analiz de son on yılda MÖÜ’lerin robotik uygulamalarında sıkça kullanıldığını ve bu kullanımların giderek arttığını göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 9. Veri tabanlarının istatistiksel analizleri:  
a) IEEE, b) Science Direct

MÖÜ’lerin farklı robotik uygulamalarındaki çeşitliliği bu MÖÜ yapılarının incelenmesini kolaylaştırmak için belirli kriterlere göre sınıflandırılmasını gerektirmektedir. Bu sınıflandırma; tasarım ve modellemedeki seviyeleri, robot türleri ve kontrol yapıları olmak üzere üç farklı grupta gerçekleştirilmiştir. Tablo 2’de ise bu sınıflandırmalara göre verilen literatür araştırmasının genel bir özeti sunulmuştur.

#### 4.1. Tasarım ve modelleme seviyelerine göre

MÖÜ’lerde farklı tasarım ve modelleme yapıları biyofiziksel, ilişkisel ve soyut model olmak üzere üç temel sınıfın ortaya çıkmasına neden olur [8,10,11]. Bunlar dışında, MÖÜ modellerinin bir canlı vücudunun biyomimetik benzetim veya deneysel modeli ile birleştirilmesinden nöromekanik adıyla başka bir tanımlama da yapılabilir [11]. Nöromekanik model biyofiziksel ve ilişkisel modeli içerir ve soyut modelin sinaptik bağlantılarına sahiptir [11,21,34,35]. Bu sebeple, MÖÜ modellerini daha önceki bölümde de bahsedildiği gibi biyofiziksel, ilişkisel ve soyut olmak üzere üç temel sınıf altında toplamak daha doğru olmaktadır [8,10,13].

##### 4.1.1. Biyofiziksel modeller

Biyofiziksel modellerin çoğu temelde Hodgkin-Huxley (H-H) tipi sinir hücresi yapılarına dayanarak geliştirilmiştir [11,18,36]. Bazı çalışmalarda da sinir hücrelerinin zar potansiyellerine ait ateşleme hızları modellenmiştir [37,38]. Son yıllarda Rigatos [39] ve Wen’in [40] yaptığı çalışmalar biyofiziksel MÖÜ yapılarının robotik sistemlere uygulanmasına örnek teşkil eder. Rigatos, H-H türü FitzHugh-Nagumo yapısının dezavantajı olan gürültüleri azaltmak için Kalman filtresi kullanarak bu yapının robotik sistemlere uygulanabilirliğini göstermiştir [39]. Wen ve arkadaşları, H-H yapıları ile kurulan MÖÜ devresinin değişkenlerini Genetik Algoritma (GA) ile saptamışlar ve bu model ile benzetim ortamında yılanı robotun hareketlerini analiz etmişlerdir [40]. Herrero-Carron ve arkadaşları ise Rulkov MÖÜ yapısı ile bir solucansı robotun sinüzoidal hareketlerini üretmişlerdir [41,42].

##### 4.1.2. İlişkisel modeller

İlişkisel MÖÜ devreleri genellikle Sızdıran Topla ve Ateşle (STA) hücrelerinden meydana gelir [11,15,23,30,43]. Bu yapıların temeli ritmik salınımlı hareketlerin ara sinir hücreleri ile nasıl üretildiği ve uygulandığı üzerine kurulmuştur [11,15,43–45]. Ekeberg, basitleştirilmiş ilişkisel bir MÖÜ yapısı geliştirmiş ve bu yapıdan 100 adet kullanarak Lamprey balıklarının

omuriliklerini modellenmiştir. Bu yapı ile Lamprey'lerin yüzüş hareketlerini gerçekleştirmiştir [23]. Li ve arkadaşları, Lamprey tabanlı MÖÜ yapısı kullanarak tırtıl

benzeri çok eklemli bir robotun engebeli ortamlarda hareketlerini üretmişler ve bu hareketleri hem deneysel hem de benzetim ortamında gerçekleştirmişlerdir [15].

**Tablo 2.** MÖÜ'lerin robotik uygulamalardaki kullanımını için genel bir özet

Hareket	Robot Türü	MÖÜ Yapısı	Yıl	Kaynak
	Tek Bacaklı	Matsuoka	2008	[10]
	İki Bacaklı	İki-Seviyeli	2012	[10]
		Matsuoka	2016	[21]
	İnsansı	Hopf	2015	[46]
		Matsuoka	2009	[47]
		Matsuoka	2016	[48]
Çok Eklemli Robotlar		Hopf	2015	[49,50]
	Dört Bacaklı	Hopf	2015	[51]
		Hopf	2011	[52]
		SO-2 MÖÜ	2008	[53,54]
	Altı Bacaklı	Matsuoka	2017	[55]
	Sekiz Bacaklı	SO-2 MÖÜ	2013	[56,57]
	Farklı Kombinasyonlu	Matsuoka	2005	[10]
Sürünge Robotlar	Yılsarı	Lamprey	2014	[15]
		Doğrusal Olmayan	2015	[58]
	Semender/Kertenkele	GDF	2007	[59,60]
	Tırtıl	Lamprey	2014	[27]
Yüzen Robotlar	Anguilliform	Andronov-Hopf	2014	[61,62]
		Zhang	2006	[63]
	Carangiform	GDF	2014	[64]
		Hopf	2006	[65]
	Ostraciiform	GDF	2006	[3,4]
		Hopf	2014	[66]
	Thunniform	Hopf	2015	[67]
	Yunus	GDF	2014	[10]
	Vatoz	GDF	2016	[68]
	Kaplumbağa	Hopf	2010	[69]
Uçan Robotlar	Kuş/Yarasa	Hopf	2010	[70]
Diğer Ritmik Hareketliler	Endüstriyel	Matsuoka	2014	[71,72]

Chowdhury ve Panda ise Matsuoka tabanlı doğrusal olmayan osilatör yapısı kullanarak iki eklemli bir robot balığın yüzgeç fonksiyonlarına göre yüzüş hareketlerini deneysel olarak sağlamışlardır [73].

#### 4.1.3. Soyut modeller

Soyut modeller, birbirine sinapslar ile bağlanan sinirsel ağ yapıları oluştururlar. Doğrusal ve doğrusal olmayan osilatörlerin matematiksel modellerine dayanarak tasarlanan bu modeller sinirsel ağların içsel dinamiklerini içerir

[11,21,22,74,75]. Bu tasarımda, farklı sinaptik bağlantılar ile farklı topolojiler oluşturularak osilatör çıkışının frekansı, genliği ve faz farkı istenilen şekilde kolayca belirlenebilir [11,59]. Ijspeert ve arkadaşları, yılanı ve semender robotların hareket kontrolü için Kuramoto tabanlı Genlik Denetimli Faz (GDF) osilatörünü tasarlamışlardır [4,59,76]. Yu ve arkadaşları ise GDF osilatörlerini kullanarak çok eklemli robot balığın ileri, geri ve dönüş hareketlerini üretmişlerdir [2,10]. Ayrıca, Hopf osilatörler de literatürde sıklıkla kullanılmıştır [10,11,17,19,67,77,78]. Bu osilatör türünde içsel genlik ve faz değerleri bileşenlerine ayrılabilir. Yu ve arkadaşları, Hopf osilatörler ile çok eklemli bir robot balığın yüzüş hareketlerini irdelemişlerdir [1,2,24]. Wang ve arkadaşları, Hopf osilatör yapısı kullanarak Carangiform türü bir balığın enine hareket sinyalini elde etmişlerdir [79]. Hu ve arkadaşları ise Hopf osilatör ile Thunniform türü robot balığın ileri yön yüzme hızını kontrol etmişlerdir [5]. Bazı çalışmalarda da Wilson-Cowan MÖÜ yapılarının farklı kuplajlama türleri ve çıkışı üzerine etkileri incelenmiştir [10,80].

## 4.2. Robot türlerine göre

Günümüzde yüzen robotlarda, çok eklemli olarak bilinen birden fazla bacaklı veya uzuvlu robotlarda, emekleyen, sürünen ve tırmanan robotlarda, kanat çırparak uçan robotlarda ve diğer ritmik hareketler ile çalışan robotlarda birbirinden farklı MÖÜ yapıları sıklıkla kullanılmaktadır [10,11,13,19,29,67,81,82]. Bu bölümde, robot türlerine göre bir sınıflandırma yapılmış ve bu sınıflandırmaya göre robotların MÖÜ yapıları incelenmiştir.

### 4.2.1. Yüzen robotlar

Literatürde yüzen robotlar incelendiğinde Anguilliform, Carangiform, Ostraciiform, Thunniform, vatoz, kaplumbağa, yılan, tek yüzgeçli, tek eklemli ve yunus benzeri olmak üzere birbirinden farklı birçok robot türü görülmektedir. Bu robot türlerinde hareket şekline göre farklı MÖÜ yapıları tercih edilmektedir. Zhang ve arkadaşları, kendi adını taşıyan doğrusal olmayan yeni bir osilatör yapısı geliştirerek altı

eklemli bir robot balığın ileri, geri ve dönüş yüzme hareketlerini üretmişlerdir [63].

Wang ve arkadaşları, halka bağlı GDF osilatörleri ile üç eklemli robot balığın ileri ve dönüş yön hareketlerini gerçekleştirmişlerdir [83]. Ayrıca, aynı osilatör modeli ile Carangiform türü bir balığın enine hareket sinyalini oluşturmuşlardır [64]. MÖÜ osilatör tabanlı kontrolörlerin programlanması üzerine bazı çalışmaları bulunmaktadır [28,84]. Aynı zamanda, GDF osilatörlerine genlik, ofset ve frekans kontrol fonksiyonları eklemek koşuluyla Ostraciiform türü bir robot balığın yörünge takibini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın başarımını arttırmak için sapma, yunuslama ve yalpalanma açılarının kontrolü de sağlanmıştır [29,85]. Aynı osilatör yapısı ile frekans ve atak açısı değişimine göre kendi geliştirdikleri robot balığın ileri yön performanslarını incelemişlerdir [86]. Bu robotun istenilen hedefe en kısa yoldan gitmesini sağlayacak bir algoritma geliştirilmiş ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile MÖÜ değişkenlerinin en uygun değerleri elde edilmiştir [87].

Ijspeert, daha önceki bölümde bahsedildiği gibi Lamprey balıklarının osilatör modelini STA ile elde ederek semender türü bir robotun yüzüş hareketlerini geliştirmişdir [76]. Crespi ve Ijspeert, bir başka çalışmada GDF osilatörleri ile Ostraciiform türü robot balığın su içerisinde farklı yüzme hareketlerini, karada bulunan düzgün bir zemin üzerinde göğüs yüzgeçleri ile ilerlemesini ve hem karada hem de suda foto diyot ile ışığa yönelimini gerçekleştirmişlerdir [3,4]. Zhang ve arkadaşları, küçük boyutlu bir robot balık prototipi geliştirerek Hopf osilatörler ile farklı yüzüş türlerini incelemişlerdir. Ayrıca bu çalışmada robotun engellerden sakınarak üç boyutlu hareketlerinin kontrolü sağlanmıştır [88]. Hu ve arkadaşları, tek eklemli bir robot balığın Hopf osilatörü ile frekans değişimine bağlı ileri yön hız performanslarını irdelemişlerdir [66]. Zhu ve arkadaşları, 24 serbestlik dereceli bir robot vatozun yüzüş davranışlarını MÖÜ'ler ile kontrol etmişlerdir [89]. Hu ve arkadaşları ise Hopf osilatörlerinin istenilen genlik ve faz değerlerini üretmesini sağlamak için bir öğrenme algoritması geliştirmişlerdir ve robotun ileri yön yüzüş hareketleri için denenmiştir [17,90]. Niu ve arkadaşları, üç boyutlu halka bağlı Andronov-Hopf osilatörleri ile Anguilliform türü bir balığın

yüzüş performansını test etmişlerdir [61,91]. Zhou ve arkadaşları, kendi geliştirdikleri MÖÜ yapısı ile sekiz eklemlili bir robot vatoz balığının sinüzoidal hareketlerini elde etmişlerdir ve GA ile MÖÜ'nün uygun parametreleri saptanmıştır [92]. Bir başka çalışmada, Sfakiotakis ve arkadaşları oransal-integral-türev kontrol yapısı kullanarak GDF osilatörleri ile sekiz eklemlili bir robot vatozun Euler açılarının kontrolünü sağlamışlardır [68]. Wang ve arkadaşları, tek eklemlili bir robot balığın kuyruk hareketlerini üretmek için sinüzoidal eklem açılarının sinyal yapısı çok uygun olmamasına rağmen Matsuoka osilatörlerini kullanmışlar ve kuyruk üzerine etki eden kuvvetlerin analizini yapmışlardır [93]. Hu ve arkadaşları ise robotun farklı hareketlerini bu osilatörler yapısı ile sınımışlardır [94]. Matsuoka osilatörleri kullanılarak yapılan çalışmalar incelendiğinde, osilatör yapısının eşzamanlı çalışmasının oldukça karmaşık olduğu görülmektedir.

Yu ve arkadaşları, geliştirdikleri MÖÜ'ler ile farklı eklem sayılarına sahip robot balıklarda yüzme hareketlerinin gerçekleştirilmesi ve kontrolü üzerine birçok çalışma yapmışlardır [1,10,32,65]. İki ve dört eklemlili robotların enine hareket sinyallerini üretmek için doğrusal olmayan bir MÖÜ ve oransal-integral-türev yapısı kullanarak derinlik kontrolünü sağlamışlardır [65,77]. Ayrıca diğer çalışmalarında, farklı yüzgeç fonksiyonlarına göre yüzüş hareketlerini Hopf ve GDF osilatörleri ile farklı kuplajlı bağlantılar oluşturarak hem benzetim hem de deneysel ortamda sınımışlardır. Osilatörlerin çıkış frekansı, genliği ve faz farklarının değişimine bağlı yüzüş hızları ve dönüş performansları da ayrıca incelenmiştir [2,19,34,58,95-98]. Yu ve arkadaşları başka bir çalışmada ise PSO ile robot balığın maksimum hızı için gerekli osilatör parametrelerini araştırmışlardır [24,99]. Aynı zamanda robot balık sürüleri için GDF osilatörleri ile bir nesneyi istenilen bir noktaya taşıma algoritması önerilmiştir [32].

#### 4.2.2. Çok eklemlili robotlar

İkili, dörtlü, altılı, sekizli veya daha farklı şekilde bacaklı/uzuvlu/eklemlili şeklinde sınıflandırılabilen robotlar literatürde çok eklemlili robotlar olarak yer alır. Araştırmacılar bu

robotların hareketlerinin MÖÜ modelleri ile daha etkin şekilde nasıl üretilebileceği ile ilgili çalışmalara da yoğunlaşmışlardır. Wörgötter ve Manoonpong sinirsel bir MÖÜ devresi ile eklem bacaklı canlıların lokomotor hareketlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu hareketleri taşlı, kumlu, karlı ve kaygan olmak üzere farklı ortamlarda sınamak için AMOS-WD06/08 isimli altı ve sekiz bacaklı iki robot geliştirmişlerdir [53,54,56,57,100]. Geliştirdikleri MÖÜ devresi; hız, filtre ve faz kontrolü gibi farklı alt katmandan meydana geldiği için oldukça karmaşık bir yapıdadır ve ilişkisel seviyede yer almaktadır [33,53]. Yu ve arkadaşları, Van der Pol osilatörü ile geliştirdikleri altı bacaklı bir robotun FPGA yoluyla ileri yön hız değişimini incelemişlerdir [100]. Zhong ve arkadaşları ise Matsuoka osilatörü kullanarak altı bacaklı örümcek robotun farklı hareket fonksiyonlarını elde etmişlerdir [55].

Literatürde eklem bacaklı robotlar dışında, dört bacaklı omurgalılarından esinlenerek geliştirilen farklı robot türleri bulunmaktadır. Ijspeert [49,50,101] ve Wang [51], adaptif Hopf osilatörü ile dört bacaklı bir robotun eklem hareket fazlarının değişimini incelemişlerdir. Ayrıca, Ijspeert, bu osilatörün hedeflenen genlik ve frekans bileşenlerine ulaşması amacıyla bir öğrenme algoritması önermiştir [50]. Wang geliştirdiği robot ile koşma, yürüme hareketlerini ve bunlar arasındaki geçişi kontrol etmiştir [102,103]. Zhang ve arkadaşları ise AIBO robotun hareketlerini Hopf osilatör ile elde etmişlerdir [52].

#### 4.2.3. İnsansı robotlar

İnsansı robotlarda hareketin hassasiyetini arttıran bacaklardaki serbestlik derecesinin artması ile robotun kontrolü zorlaşmaktadır. Bunun için farklı MÖÜ yapıları ile birçok çalışma mevcuttur. Liu ve arkadaşları, bir NAO robotun eğimli ve düzensiz arazilerdeki yürüme hareketlerini sıfır moment noktası ile üretmek Matsuoka osilatörü yardımıyla kontrol etmişlerdir [21]. Zhang ve arkadaşları da bu robotun bacak hareket yörüngelerini oluşturarak Hopf osilatörü ile deneysel olarak test etmişlerdir [46]. Ryu ve arkadaşları, Matsuoka osilatörleri ile HOAP-3 insansı robotun alt ve üst bacaklarının eş zamanlı koordinasyonunu sağlamışlardır. Geri besleme

sinyali için robotun ayakların yere temas ettiği zaman değeri kullanılmıştır [47]. Avrin ve arkadaşları ise insansı bir robotun eş zamanlı bacak hareketini üreten Matsuoka osilatörün parametrelerini PSO ile belirlemişlerdir [48]. Liu ve arkadaşları, bu osilatörden 12 adet kullanarak bir insanın kalça merkezli hareketlerini gerçekleştirmişlerdir [74]. Yapılan bu çalışmalar özellikle Matsuoka osilatörler üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak, bu osilatörlerin oldukça karmaşık yapıları uygun parametre değerlerinin belirlenmesini zorlaştırır.

#### 4.2.4. Sürünge robotlar

Yılan, semender, kertenkele, tırtıl, solucan ve benzeri robotlar literatürde sürünge robotlar olarak bilinir ve doğadaki bu sürünge robotlar robotik alanında sıklıkla modellendiği ve prototiplerinin gerçekleştirildiği görülmektedir. Ijspeert ve arkadaşları, sürünge robotların hareketlerini taklit edebilen modüler yapıda çok eklemli birçok robot geliştirmişlerdir [104]. Yamor isimli bu eklemli robotun Bluetooth yoluyla haberleşerek yılanı bir robot modelini gerçekleştirebilirler. Bu robot, GDF osilatörleri ile yılan ve tırtıl hareket fonksiyonlarını oluşturabilmiştir [105]. Ijspeert ve arkadaşları, kendi geliştirdikleri AmphiBot isimli robotun GDF osilatörleri ile hareketlerini üretmişlerdir [59,60]. Li ve arkadaşları, Lamprey türü MÖÜ yapısı kullanarak çok eklemli bir robotun yılan ve tırtıl hareketlerini taklit edebilmesini sağlamışlardır [15,27]. Zhang ve arkadaşları, yılan robotun çeşitli hareketlerini Hopf osilatörlerinin farklı sinaptik bağlantıları ile analiz etmişlerdir ve frekans değişimine göre hız performanslarını incelemişlerdir [106]. Bing ve arkadaşları ise yılan robotun hareketli bir nesneyi takip edebilmesi için gerekli hareket fonksiyonlarını doğrusal olmayan MÖÜ'ler ile gerçekleştirmişlerdir [58].

#### 4.2.5. Diğer ritmik hareketli robotlar

Bazı çalışmalarda ise MÖÜ yapıları daha farklı robot türleri için kullanılmaktadır. Chung ve arkadaşları, yarası benzeri kanat çırparak uçan bir robotun hareketlerini Hopf osilatörü kullanarak oluşturmuşlardır ve kanat çırpma frekansının kontrolü de gerçekleştirmişlerdir [70].

Kwon ve arkadaşları da Matsuoka osilatörlerini çok eklemli bir robot kolun tutucu ucunun kontrolü için kullanmışlardır [71,72].

### 4.3. Kontrol yöntemlerine göre

Robot uygulamalarında kullanılan çeşitli MÖÜ yapıları kendi içerisinde duyuşal geri beslemeye sahip olmayan açık çevrim ve duyuşal geri beslemeli kapalı çevrim olmak üzere iki grupta incelenebilir. Bu bölüme kadar anlatılan MÖÜ çalışmalarının çoğu duyuşal geri beslemesiz açık çevrim kontrol yapısına sahiptir. Ancak duyuşal geri beslemeli kapalı çevrim bir MÖÜ yapısı hem canlının hareketlerinin daha uygun üretilebilmesi hem de robotun çevresel etkilere karşı dayanımının artırılması için oldukça önemlidir. Böylece bir canlının tam olarak taklit edilmesi için MÖÜ modeline eklenen duyuşal geri besleme yeteneği biyomimetik kontrolör tasarımının vazgeçilmezlerindendir [10,11].

Literatürde, MÖÜ'lerin kullanıldığı robotik çalışmalar incelendiğinde bazı duyuşal geri beslemeli kapalı çevrim çalışmaların bulunduğu görülmüştür. Wang ve arkadaşları, duyuşal işlemci merkezi olarak tanımladıkları geri beslemeli bir tasarım kullanarak geliştirdikleri robotun osilatör parametrelerini PSO algoritması ile en uygun yörünge ve hız değerleri için eşzamanlı olarak belirlemişlerdir [87]. Başka bir çalışmada, tek eklemli robotun sapma ve yalpalama açıları IMU sensörü ile geri besleme bilgisi alınıp PID ve GDF osilatör tabanlı kontrolöre aktarılmıştır ve robotun kapalı çevrim hareket kontrolü sağlanmıştır [29]. Ijspeert ve arkadaşları, engebeli bir arazide dört bacaklı bir robotun Hopf ile bu osilatör çıkışını belirleyen eşitliğe matematiksel bir geçiş fonksiyonu ekleyerek bacak hareketlerinin faz değişimlerini kontrol etmişlerdir [78,101].

Yu ve arkadaşları, iki eklemli bir robot balığın derinlik seviyesinin kontrolü için basınç sensörü kullanarak geri beslemeli kapalı çevrim bir sistem oluşturmuşlardır. Bulanık bir kontrolör ile robotun göğüs yüzgeçlerinin hareketini sağlayan osilatörlerin ofset değerleri belirlenmiştir [77]. Ayrıca başka bir çalışmada, dört eklemli bir robot balığın engellerden sakınarak iki boyutlu hareketinin gerçekleşmesini sağlamak Hopf osilatörü kullanılmıştır.



Osilatörün ofset ve genlik değerlerini elde etmek için basit bir geçiş fonksiyonundan yararlanılmıştır [34]. Wu ve arkadaşları, dört eklemlili bir robotun iki boyutlu hareketlerini Hopf osilatörleri elde etmişler ve bu osilatörün ofset değişkenini oransal kontrolör ile belirleyerek robotun sapma açısı kontrolünü sağlamışlardır [19]. Hu ve arkadaşları, dört kol mekanizması kullanarak tasarladıkları robot balığın kuyruk eklemlerini kontrol etmek için Hopf osilatörleri kullanmışlardır. Robotun yalpalanma ve yunuslama açıları IMU sensörü ile geri besleme bilgisi alınarak oransal-integral-türev kontrolör aracılığıyla kontrol edilmiştir. Ancak bu çalışmadaki geri besleme tasarımı osilatör modeli ile ilişkili değildir [67]. Kim ve arkadaşları ise geliştirdikleri robotun hareketlerini Matsuoka osilatörleri ile sağlamışlar ve oransal-türev kontrolör kullanarak osilatör ofset değerleri ile robotun sapma açısının kontrolünü sağlamışlardır [75].

Seo ve arkadaşları, yüzen bir robot kaplumbağa geliştirmişler ve robotun hareketlerini Hopf osilatörleri ile üretmişlerdir. Bu osilatörlerin çıkışında elde edilen sinüzoidal sinyaller oransal-türev kontrolöre aktararak robotun sapma, yunuslama ve yalpalanma hareketleri kontrol edilmiştir [69].

Li ve arkadaşları, tırtıl robotun Lamprey türü MÖÜ osilatörleri ile engellerden sakınarak ve engebeli ortamlarda hareket kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. MÖÜ yapısının en uygun parametreleri ise GA ile belirlenmiştir [15]. Wang ve arkadaşları, insansı bir robotun bacak faz geçişlerini Matsuoka osilatörler ve oransal-türev kontrolör kullanarak istenilen fazlarda kontrol etmişlerdir [107]. Benzer bir çalışmada, Liu ve arkadaşları tarafından insansı bir robotun yürüme hareketleri Matsuoka osilatörler ile üretilmiş ve bu osilatörlerin genlik değerleri oransal kontrolör yardımıyla elde edilmiştir [21]. Hong ve Lee ise insansı robotun bacaklarını benzetim ortamına aktararak Matsuoka osilatörler ve sıfır moment noktası kontrolü ile hareketini üretmişlerdir [108].

## 5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, günümüzde oldukça popüler olan farklı robot türlerinin hareket koordinasyonunun sağlanması ve kontrolü için kullanılan farklı MÖÜ yapıları ve bu yapıların

robotlarda uygulama alanları detaylı bir şekilde incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

MÖÜ'ler canlıların davranış tabanlı ritmik hareketlerini sağlayan dayanıklı sinirsel yapılardır. Robotların akıllı hareket kontrolünün MÖÜ'ler ile sağlanması biyomimetik tasarımın temel ilkelerini içermektedir. Bu yönüyle MÖÜ yapıları bu çalışmada bahsi geçmeyen ve farklı canlılardan esinlenen daha birçok robotta kullanıma uygundur. Bu durum için robotun hareketlerinin eklemler ile sağlanması yeterlidir.

Literatürde yer alan MÖÜ yapılarının geliştirilmesi ve modifikasyonları ile farklı, yeni ve hibrit MÖÜ yapıları daha karmaşık robot hareketlerinin sağlanması için de kullanılabilir. Bu hareketleri en etkin şekilde sağlayacak MÖÜ yapısının ve bu yapının seviyesinin uygun şekilde belirlenmesi robot hareketlerinin esinlenen canlıların hareketleri ile büyük oranda örtüşmesini sağlar.

Literatürde yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde incelendiğinde, sinirsel MÖÜ yapıları çok eklemlili robot hareketlerinin üretilmesi için oldukça uygun bir yapıya sahip olmasına rağmen bu çalışmaların büyük çoğunluğu duyuşal geri beslemesiz açık çevrim veya oldukça temel seviyede geri beslemeli yapıya sahip MÖÜ modellerini içerir. Bu sebeple, akıllı kontrol algoritmalarına dayalı duyuşal geri beslemeli ve kapalı çevrim kontrol yapısına sahip MÖÜ modellerinin de hala gelişmeye açık bir konu olduğu görülmektedir.

## 6. Kaynaklar

1. Wang, M., Yu, J. and Tan, M. (2014). CPG-based sensory feedback control for bio-inspired multimodal swimming. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **11**: 1–11.
2. Yu, J., Wang, M., Su, Z., Tan, M. and Zhang, J. (2013). Dynamic modeling of a CPG-governed multijoint robotic fish. *Advanced Robotics*, **27(4)**: 275–285.
3. Lachat, D., Crespi, A. and Ijspeert, A.J. (2006). BoxyBot: a swimming and crawling fish robot controlled by a central pattern generator. *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, BioRob 2006*, Pisa, Italy, 20-22 Feb., 643-648.
4. Crespi, A., Lachat, D., Pasquier, A. and Ijspeert, A.J. (2008). Controlling swimming and crawling in a fish robot using a central pattern generator. *Autonomous Robots*, **25(1–2)**: 3–13.

5. Huss, M. (2007). Computational modeling of the lamprey cpg. PhD Thesis, Stockholm University.
6. Ijspeert, A.J. (1998). Design of artificial neural oscillatory circuits for the control of lamprey-and salamander-like locomotion using evolutionary algorithms. PhD Thesis, University of Edinburgh.
7. Marbach, D. (2005). Evolution and online optimization of central pattern generators for modular robot locomotion. Master Thesis, School of Computer and Communication Sciences, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne.
8. Li, G. (2013). Hierarchical control of limbless locomotion using a bio-inspired cpg model. PhD Thesis, University of Hamburg.
9. Crespi, A. (2007). Design and control of amphibious robots with multiple degrees of freedom. PhD Thesis, Lausanne, EPFL.
10. Yu, J., Tan, M., Chen, J., and Zhang, J. (2014). A survey on cpg-inspired control models and system implementation. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, **25(3)**: 441–456.
11. Ijspeert, A.J. (2008). Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review. *Neural Networks*, **21(4)**: 642–653.
12. Dörfler, F. and Bullo, F. (2014). Synchronization in complex networks of phase oscillators: a survey. *Automatica*, **50(6)**: 1539–1564.
13. Wu, Q.D., Liu, C.J., Zhang, J.Q. and Chen, Q.J. (2009). Survey of locomotion control of legged robots inspired by biological concept. *Science in China, Series F: Information Sciences*, **52(10)**: 1715–1729.
14. Mackay-lyons, M. (2012). Central pattern generation of locomotion: a review of the evidence. *Physical Therapy*, **82(1)**: 69–83.
15. Li, G., Zhang, H., Zhang, J. and Bye, R.T. (2014). Development of adaptive locomotion of a caterpillar-like robot based on a sensory feedback cpg model. *Advanced Robotics*, **28(6)**: 389–401.
16. Adak., Ö.K. (2013). Quadruped locomotion reference synthesis with central pattern generators tuned by evolutionary algorithms. Master Thesis, Sabanci University.
17. Hu, Y., Liang, J. and Wang, T. (2014). Parameter synthesis of coupled nonlinear oscillators for cpg-based robotic locomotion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **61(11)**: 6183–6193.
18. Righetti, L., Buchli, J. and Ijspeert, A.J. (2006). Dynamic hebbian learning in adaptive frequency oscillators. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **216(2)**: 269–281.
19. Wu, Z., Yu, J., Tan, M. and Zhang, J. (2014). Kinematic comparison of forward and backward swimming and maneuvering in a self-propelled sub-carangiform robotic fish. *Journal of Bionic Engineering*, **11(2)**: 199–212.
20. Jadbabaie, A., Motee, N., Barahona, M. (2004). On the stability of the kuramoto model of coupled nonlinear oscillators, *American Control Conference*, Boston, M.A, USA, 30 June-2 July, 4296-4301.
21. Chengju, L., Danwei, W., Erik, D., G., Qijun, C. (2016). Adaptive walking control of biped robots using online trajectory generation method based on neural oscillators. *Journal of Bionic Engineering*, **13(4)**: 572–584.
22. Taga, G. (1995). A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion - I. Emergence of basic gait. *Biological Cybernetics*, **73(2)**: 97–111.
23. Ekeberg, Ö. (1993). A combined neuronal and mechanical model of fish swimming. *Biological Cybernetics*, **69(5–6)**: 363–374.
24. Yu, J., Wu, Z., Wang, M. and Tan, M., (2016). CPG network optimization for a biomimetic robotic fish via pso. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, **27(9)**: 1962–1968.
25. Li, G., Zhang, H., Herrero-Carron, F., Hildre, H.P. and Zhang, J. (2011). A novel mechanism for caterpillar-like locomotion using asymmetric oscillation. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, Budapest, Hungary, 3-7 July, 164–169.
26. Li, G., Deng, Y., Osen, O.L., Bi, S. and Zhang, H. (2016). A bio-inspired swimming robot for marine aquaculture applications: from concept-design to simulation. *OCEANS 2016*, Shanghai, China, 10-13 April, 1-7.
27. Li, G., Zhang, H., Zhang, J. and Hildre HP. (2014). An approach for adaptive limbless locomotion using a cpg-based reflex mechanism. *Journal of Bionic Engineering*, **11(3)**: 389–399.
28. Li, L., Wang, C. and Xie, G. (2015). A general cpg network and its implementation on the microcontroller. *Neurocomputing*, **167**: 299–305.
29. Wang, W. and Xie, G. (2014). CPG-based locomotion controller design for a boxfish-like robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **11(6)**: 87.
30. Li, G., Zhang, H., Li, W., Hildre, H.P. and Zhang, J. (2014). Design of neural circuit for sidewinding of snake-like robots. *IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2014*, Hailar, China, 28-30 July, 333–338.
31. Ding, R., Yu, J., Yang, Q. and Tan, M. (2013). Dynamic modelling of a cpg-controlled amphibious biomimetic swimming robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **10(4)**: 199.

32. Yu, J., Wang, C. and Xie, G. (2016). Coordination of multiple robotic fish with applications to underwater robot competition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **63(2)**: 1280–1288.
33. Goldschmidt, D., Wörgötter, F. and Manoonpong, P. (2014). Biologically-inspired adaptive obstacle negotiation behavior of hexapod robots. *Frontiers in Neurorobotics*, **8**: 1–16.
34. Yu, J., Wang, K., Tan, M. and Zhang, J. (2014). Design and control of an embedded vision guided robotic fish with multiple control surfaces. *The Scientific World Journal*, **2014**: 1-14
35. Mili, P., Cizek, P. and Faigl, J. (2016). On chaotic oscillator-based central pattern generator for motion control of hexapod walking robot. *CEUR Workshop Proceedings*, **1649**: 131–137.
36. Izhikevich, E.M. (2003). Simple model of spiking neurons. *IEEE Transactions on Neural Networks*, **14(6)**: 1569–1572.
37. Lin K.K. (2006). Entrainment and chaos in a pulse-driven hodgkin–huxley oscillator. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*, **5(2)**: 179–204.
38. Thurman, Z. (2013). Dynamics of the fitzhugh-nagumo neuron model, Senior Project, California Polytechnic State University.
39. Rigatos, G. (2014). Robust synchronization of coupled neural oscillators using the derivative-free nonlinear kalman filter. *Cognitive Neurodynamics*, **8(6)**: 465–478.
40. Wen, P., Linsen, X., Baolin, F. and Zhong, W. (2015). CPG control model of snake-like robot parameters of optimization based on ga. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE-ROBIO 2015*, Zhuhai, China, 6-9 Dec., 1944–1949.
41. Herrero-Carron, F. (2011). Novel central pattern generator elements for autonomous modular robots. PhD Thesis, Autonoma De Madrid University.
42. Herrero-Carron, F., Rodriguez, F.B. and Varona, P. (2011). Bio-inspired design strategies for central pattern generator control in modular robotics, *Bioinspiration and Biomimetics*, **6(1)**: 016006.
43. Ijspeert, A.J. (2001). A connectionist central pattern generator for the aquatic and terrestrial gaits of a simulated salamander. *Biological Cybernetics*, **84(5)**: 331–348.
44. Patel, L.N., Murray, A. and Hallam, J. (2007). Super-lampreys and wave energy: optimised control of artificially-evolved, simulated swimming lamprey. *Neurocomputing*, **70(7–9)**: 1139–1154.
45. Donati, E., Corradi, F., Stefanini, C. and Indiveri G. (2014). A spiking implementation of the lamprey’s central pattern generator in neuromorphic vlsi. *IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*, Lausanne, Switzerland, 22-24 Oct., 1-4.
46. Zhang, X., Xiong, J., Weng, S., Li, H., Chen, M., Gan, Y., Zhao, Q., Xia, Z. (2015). A modified gait planning method for biped robot based on central pattern generators. *IEEE International Conference on Information and Automation*, Lijiang, China, 8-10 Aug., 1551–1555.
47. Ryu, J.K., Chong, N.Y., You, B.J. and Christensen, H. (2009). Adaptive cpg based coordinated control of healthy and robotic lower limb movements. *IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Toyama, Japan, 27 Sept.-2 Oct., 122–127.
48. Avrin, G., Makarov, M., Rodriguez-Ayerbe, P. and Siegler, I.A. (2016). Particle swarm optimization of matsuoaka’s oscillator parameters in human-like control of rhythmic movements. *Proceedings of the American Control Conference*, Boston, MA, USA, 6-8 July, 342–347.
49. Heim, S.W., Ajallooeian, M., Eckert, P., Vespignani, M. and Ijspeert, A.J. (2015). On designing an active tail for body-pitch control in legged robots via decoupling of control objectives. *Assistive Robotics: Proceedings of the 18th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR)*, **43(3)**: 338–346.
50. Buchli, J., Iida, F. and Ijspeert A.J. (2006). Finding resonance: adaptive frequency oscillators for dynamic legged locomotion. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China. 9-15 Oct., 3903–3909.
51. Li, X., Wang, W. and Yi, J. (2015). Gait transition based on cpg modulation for quadruped locomotion. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, Busan, South Korea, 7-11 July, 500–505.
52. ZHANG, J. (2011). Dynamic walking of aibo with hopf oscillators. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **24(4)**: 612.
53. Manoonpong, P., Pasemann, F. and Wörgötter, F. (2008). Sensor-driven neural control for omnidirectional locomotion and versatile reactive behaviors of walking machines. *Robotics and Autonomous Systems*, **56(3)**: 265–288.
54. Steingrube, S., Timme, M., Wörgötter, F. and Manoonpong, P. (2010). Self-organized adaptation of a simple neural circuit enables

- complex robot behaviour. *Nature Physics*, **6(3)**: 224–230.
55. Zhong, G., Chen, L., Jiao, Z., Li, J. and Deng, H. (2017). Locomotion control and gait planning of a novel hexapod robot using biomimetic neurons. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1–13.
  56. Xiong, X., Wörgötter, F. and Manoonpong P. (2014). Neuromechanical control for hexapedal robot walking on challenging surfaces and surface classification. *Robotics and Autonomous Systems*, **62(12)**: 1777–1789.
  57. Manoonpong, P., Parlitz, U. and Wörgötter, F. (2013). Neural control and adaptive neural forward models for insect-like, energy-efficient, and adaptable locomotion of walking machines. *Frontiers in Neural Circuits*, **7**: 1–28.
  58. Wu, Z.X., Yu, J.Z., Su, Z.S., Tan, M. and Li, Z.L. (2015). Towards an esox lucius inspired multimodal robotic fish. *Science China Information Sciences*, **58(5)**: 1–13.
  59. Ijspeert, A.J. and Crespi, A. (2007). Online trajectory generation in an amphibious snake robot using a lamprey-like central pattern generator model. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, 10-14 April, 262–268.
  60. Crespi, A. and Ijspeert, A.J. (2006). AmphiBot II: an amphibious snake robot that crawls and swims using a central pattern generator. *9th International Conference on Climbing and Walking Robots*, Brussels, Belgium, September, 19-27
  61. Niu, X., Xu, J., Ren, Q. and Wang, Q. (2014). Locomotion learning for an anguilliform robotic fish using central pattern generator approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **61(9)**: 4780–4787.
  62. Niu, X. and Xu, J. (2014). Modeling, control and locomotion planning of an anguilliform robotic fish, *Unmanned Systems*, **2(4)**: 295-321.
  63. Zhang, D., Hu, D., Shen, L. and Xie, H. (2006). A bionic neural network for fish-robot locomotion. *Journal of Bionic Engineering*, **3(4)**: 187–194.
  64. Li, L., Wang, C. and Xie, G. (2014). Modeling of a carangiform-like robotic fish for both forward and backward swimming: based on the fixed point. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Hong Kong, China, 31 May-7 June, 800–805.
  65. Zhao, W., Yu, J., Fang, Y. and Wang, L. (2006). Development of multi-mode biomimetic robotic fish based on central pattern generator. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 9-15 Oct., 3891–3896.
  66. Hu, Y., Zhang, S., Liang, J. and Wang, T. (2014). Development and cpg-based control of a biomimetic robotic fish with advanced underwater mobility. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Hong Kong, China, 31 May-7 June, 813–818.
  67. Hu, Y., Liang, J., and Wang, T. (2015). Mechatronic design and locomotion control of a robotic thunniform swimmer for fast cruising. *Bioinspiration & biomimetics*, **10(2)**: 026006.
  68. Sfakiotakis, M., Gliva, R. and Mountoufaris, M. (2016). Steering-plane motion control for an underwater robot with a pair of undulatory fin propulsors. *24th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2016*, Athens, Greece, 21-24 June, 496–503.
  69. Seo, K., Chung, S.J. and Slotine, J.J.E. (2010). CPG-based control of a turtle-like underwater vehicle. *Autonomous Robots*, **28(3)**: 247–269.
  70. Chung, S-J. and Dorothy, M. (2010). Neurobiologically inspired control of engineered flapping flight. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **33(2)**: 440–453.
  71. Kwon, J., Yang, W., Lee, H., Bae, J.H. and Oh, Y. (2014). Biologically inspired control algorithm for an unified motion of whole robotic arm-hand system. *IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Edinburgh, UK, 25-29 Aug., 398–404.
  72. Kwon, J. and Kim, H. (2016). The enhanced performance of a robotic arm control based on neural oscillator networks. *42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 23-26 Oct., 803-808.
  73. Chowdhury, A.R. and Panda, S.K. (2015). Finding answers to biological control methods using modulated patterns: an application to bio-inspired robotic fish. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seattle, WA, USA, 26-30 May., 3146–3153.
  74. Liu, G.L., Habib, M.K., Watanabe, K. and Izumi, K. (2008). Central pattern generators based on matsuoka oscillators for the locomotion of biped robots. *Artificial Life and Robotics*, **12(1–2)**: 264–269.
  75. Kim, D.H., Leei S. and Park, J. (2008). Design of central pattern generators (cpgs) for trajectory tracking of fish-mimetic robots. *7th WSEAS international conference on computational intelligence, man-machine systems and cybernetics, (WSEAS)*, 191–196.
  76. Ijspeert, A.J., Crespi, A. and Cabelguen, J.M. (2005). Simulation and robotics studies of salamander locomotion: applying

- neurobiological principles to the control of locomotion in robots. *Neuroinformatics*, **3(3)**: 171–196.
77. Yu, J., Chen, S., Wu, Z. and Wang, W. (2016). On a miniature free-swimming robotic fish with multiple sensors. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **13(2)**: 62.
  78. Righetti, L. and Ijspeert, A.J. (2008). Pattern generators with sensory feedback for the control of quadruped locomotion. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, 19-23 May, 819–824.
  79. Wang, T., Hu, Y. and Liang, J. (2013). Learning to swim: a dynamical systems approach to mimicking fish swimming with cpg. *Robotica*, **31(3)**: 361–369.
  80. Ahmadizadeh, S., Netic, D., Grayden, D.B. and Freestone, D.R. (2015). Analytic synchronization conditions for a network of wilson and cowan oscillators. *IEEE Conference on Decision and Control*, Osaka, Japan, 15-18 Dec., 3104–3109.
  81. Wright, J. and Jordanov, I. (2015). Intelligent approaches in locomotion - a review. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, **80(2)**: 255–277.
  82. Fang, Y., Hu, J., Liu, W., Chen, B., Qi, J. and Ye, X. (2016). A cpg-based online trajectory planning method for industrial manipulators. *Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems, ACIRS 2016*, Tokyo, Japan, 20-22 July, 41–46.
  83. Wang, C., Xie, G., Wang, L. and Cao, M. (2011). CPG-based locomotion control of a robotic fish: using linear oscillators and reducing control parameters via pso. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, **7(7 B)**: 4237–4249.
  84. Li, L., Wang, C., Xie, G. and Shi, H. (2014). Digital implementation of cpg controller in avr system. *33rd Chinese Control Conference, CCC 2014*, Nanjing, China, 28-30 July, 8293–8298.
  85. Wang, W., Guo, J., Wang, Z. and Xie, G. (2013). Neural controller for swimming modes and gait transition on an ostraciiform fish robot. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics: Mechatronics for Human Wellbeing, AIM 2013*, Wollongong, NSW, Australia, 9-12 July, 1564–1569.
  86. Wang, W., Xie, G. and Shi, H. (2014). Dynamic modeling of an ostraciiform robotic fish based on angle of attack theory. *International Joint Conference on Neural Networks*, Beijing, China, 6-11 July, 3944–3949.
  87. Wang, W., Gu, D. and Xie, G. (2017). Autonomous optimization of swimming gait in a fish robot with multiple onboard sensors. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 1–13.
  88. Zhang, S., Qian, Y., Liao, P., Qin, F. and Yang, J. (2016). Design and control of an agile robotic fish with integrative biomimetic mechanisms. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **21(4)**: 1846–1857.
  89. Zhu, M., Xu, W. and Cheng, L.K. (2017). Esophageal peristaltic control of a soft-bodied swallowing robot by the central pattern generator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **22(1)**: 91–98.
  90. Hu, Y., Tian, W., Liang, J. and Wang, T. (2011). Learning fish-like swimming with a cpg-based locomotion controller. *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA, USA, 25-30 Sept., 1863–1868.
  91. Niu, X. (2013). Modeling, control and locomotion planning of an anguilliform fish robot. PhD Thesis, Harbin Institute of Technology, China.
  92. Zhou, C. and Low, K.H. (2014). On-line optimization of biomimetic undulatory swimming by an experiment-based approach. *Journal of Bionic Engineering*, **11(2)**: 213–225.
  93. Wang, L., Wang, S., Cao, Z., Tan, M., Zhou, C., Sang, H. and Shen Z. (2005). Motion control of a robot fish based on cpg. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, Hong Kong, China, 14-17 Dec., 1263–1268.
  94. Hu, Y., Zhao, W., Wang, L. and Jia, Y. (2008). Neural-based control of modular robotic fish with multiple propulsors. *IEEE Conference on Decision and Control*, Cancun, Mexico, 9-11 Dec., 5232–5237.
  95. Yu, J., Wang, M., Su Z., Tan, M. and Zhang, J. (2011). Dynamic modeling and its application for a cpg-coupled robotic fish. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, China, 9-13 May, 159-164.
  96. Wu, Z., Yu, J., Su, Z. and Tan, M. (2013). An improved multimodal robotic fish modelled after esox lucius. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2013*, Shenzhen, China, 12-14 December, 516–521.
  97. Wu, Z., Yu, J., Su, Z. and Tan, M. (2014). Implementing 3-d high maneuvers with a novel biomimetic robotic fish, *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, **47(3)**: 4861–4866.
  98. Wang, M., Yu, J.Z., Tan, M. and Zhang, J.W. (2012). Multimodal swimming control of a robotic fish with pectoral fins using a cpg network. *Chinese Science Bulletin*, **57(10)**: 1209–1216.

99. Wu, Z., Yu, J. and Tan, M. (2012). CPG parameter search for a biomimetic robotic fish based on particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2012*, Guangzhou, China, 11-14 Dec., 563–568.
100. Haitao, Y., Haibo, G., Liang D., Mantian Li, Z., and Liu G. (2016). Gait generation with smooth transition using cpg-based locomotion control for hexapod walking robot, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **63(9)**: 5488–5500.
101. Gay, S., Santos-Victor, J. and Ijspeert, A.J. (2013). Learning robot gait stability using neural networks as sensory feedback function for central pattern generators. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokyo, Japan, 3-7 Nov., 1–8.
102. Huang, Z. and Wang, W. (2016). Controller-switching based gait transition for a quadruped robot, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2016*, Harbin, China, 7-10 Aug., 653–658.
103. Li, X., Wang, W. and Yi, J. (2016). Foot contact force of walk gait for a quadruped robot, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2016*, Harbin, China, 7-10 Aug., 659–664.
104. Marbach, D. and Ijspeert, A.J. (2005). Online optimization of modular robot locomotion. *IEEE International Conference Mechatronics and Automation*, Niagara Falls, Ont., Canada, 29 July-1 Aug., 248–253.
105. Sproewitz, A., Moeckel, R., Maye, J. and Ijspeert, A.J. (2008). Learning to move in modular robots using central pattern generators and online optimization. *International Journal of Robotics Research*, **27(3–4)**: 423–443.
106. Wang, Z., Gao, Q. and Zhao, H. (2017). CPG-inspired locomotion control for a snake robot basing on nonlinear oscillators. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, **85(2)**: 209–227.
107. Wang, Z., He, B., Shen, R. and Meng, W. (2015). Contact impact inhibition strategy for biped robot walking based on central pattern generator. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE-ROBIO 2015*, Zhuhai, China, 6-9 Dec., 733–738.
108. Hong, Y-D. and Lee, B. (2017). Evolutionary optimization approach for optimal hopping of humanoid robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **64(2)**: 1279–1283.

## Cu-13Al-4Ni Şekil Hatırlama Alaşımında Çekme Gerilmesinin Mikro Yapıya Etkileri

Ş.Nevin BALO, Mehmet CEYLAN

Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 23119, Elazığ  
nbalo@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 08.06.2018; Kabul/Accepted: 23.07.2018)

### Özet

Bu çalışmada Cu-13Al-4Ni (% ağırlıkça) şekil hatırlama alaşımı kullanıldı. Çekme testi için hazırlanan alaşım numunelerine 63.21 kg/mm<sup>2</sup>, 68.9 kg/mm<sup>2</sup> ve 71.8 kg/mm<sup>2</sup>lik çekme gerimesi uygulandı. Gerilmenin etkisi metalografik gözlemler, X-ışını ve DSC (Diferansiyel Tarama Kalorimetresi) ölçümleri ile incelendi. Metalografik gözlemler ile martensit plakaları ve oluşumları belirlendi. X-ışını analizleri ile çekme gerilmesine bağlı olarak meydana gelen düzlemler analiz edildi. Termal ölçümler ile çekme geriliminin karakteristik dönüşümün sıcaklıkları üzerindeki etkisi incelendi.

**Anahtar Kelimeler:** Şekil hatırlamalı alaşım, Germe zoru, Mikro yapı

## Effect to Microstructure of Tensile Stress in Cu-13Al-4Ni Shape Memory Alloy

### Abstract

In this study Cu-13Al-4Ni (% wt) shape memory alloy was used. Tensile strain was applied of 63.21 kg / mm<sup>2</sup>, 68.9 kg / mm<sup>2</sup> and 71.8 kg / mm<sup>2</sup> to the samples prepared for tensile test from the Cu-13Al-4Ni shape memory alloy. Tensile strain effect was investigated by metallographic observations, X-ray and DSC (Differential Scanning Calorimetry) measurements. The accuration of martensite plates were determined by metallographic observations. The diffraction planes which were depend on stress-strain was analysed by X-ray measurements. The effect of stress-strain on characteristic transformation temperatures was determined by thermal measurements.

**Keywords:** Shape memory alloy, Tensile strain, Microstructure

### 1.Giriş

Martensitik faz dönüşümü, numunenin sıcaklığının düşürülmesi veya austenit yapıya uygulanan zor ile yada her iki faktörün birlikte uygulanmasıyla meydana gelir.

B2 (CsCl) veya DO<sub>3</sub> (Fe<sub>3</sub>Al) düzenli ana faz soğutulduğunda martensit dönüşümü sonucunda oluşan katmanlı yapılar birbiriyle ikiz ilişkili plakalar şeklinde düzenlenir. Şekil değişiklikleri ikiz ara yüzeylerinin hareketi sonucunda olduğundan dolayı, ısıtıldığında ana faza dönüşen numune ilk şeklini alır. Bu olaya şekil hatırlama olayı denir. Şekil hatırlama olayı genellikle soy metal bakır bazlı alaşımlarda gözlenir [1].

Şekil hatırlamalı alaşımların termoelastik martensitik dönüşümü ile bütünleştiği ifade

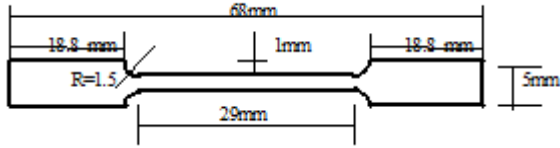
edilebilir. Şekil hatırlamalı alaşımlar, ısıtıldığında önceden belirlenmiş şekle geri dönebilme kabiliyetine sahip yeni malzemelerdir [2]. Bu alaşımlar kritik bir dönüşüm sıcaklığının altında ve üstünde iki ayrı şekil gösterirler. Kritik sıcaklığın altında martensit yapı oluşmaya başlar ve sıcaklık düşüşüyle büyür. Sıcaklık yükseldiğinde martensit yapı küçülür ve kaybolur [3]. Ayrıca şekil hatırlama etkisi ve süper elastiklik ile karakterize edilen akıllı fonksiyonel malzemelerin bir türü olan şekil hatırlamalı alaşımlar askeri ve sivil alanlarda yaygın olarak uygulanmaktadır. Seksen yıldan fazla bir süredir araştırmacılar ve mühendislerden büyük ilgi görmektedir. Bilhassa zor-zorlanma eğrisinde histerisis genişliği veya histerisis alanı şekil hatırlama alaşımlarının enerji absorpsiyonu, sismik

koruma yapıları veya bileşenleri için umut vericidir [4]. Bu malzemeler, benzersiz özelliklerinden dolayı en önemli mühendislik problemlerine standart dışı çözümler bulmayı mümkün kılar. Şekil hatırlama alaşımlarının uygulama alanları çok çeşitlidir ve sürekli olarak genişlemektedir. Bunlar uzay teknolojisi, tıp, robotik, elektrik mühendisliği gibi alanları içermektedir [5].

Bu çalışmada Cu-13Al-4Ni (% ağırlıkça) şekil hatırlama alaşımının farklı büyüklüklerde uygulanan çekme gerilmesi karşısında şekil hatırlama özelliği ve mikro yapı üzerindeki etkileri incelendi.

## 2. Materyal ve Metot

Cu-13Al-4Ni (% ağırlıkça) şekil hatırlama alaşımı Fransa'dan TREFIMETAUX Centre de Recherche'den temin edildi. Alaşım 8mm eninde 1mm kalınlığında 200 mm uzunluğunda plakalar şeklindedir. Çekme deneyi için standarda uygun üç parça hazırlandı.



Şekil 1. Alaşım numunesinden hazırlanan çekme deneyi parçası.

Alaşım numunelerinden hazırlanan parçalar üzerine çekme deneyi yapmadan önce ısıtıl işlem yapıldı.  $\beta$ -faz bölgesinde (920 °C de) 20 dakika süreyle tavlanan numuneler  $\beta$ -tipi martensit yapıya dönüşümün sağlanması için tuzlu-buzlu suya atılarak ani soğutuldu. Isıl işlemler numunelerin çekme deneyinde HOUNSFIELD makinası kullanıldı.

Metaloğrafik gözlemler için ısıtıl işlemler, çekme gerilmesi uygulanmamış ve uygulanmış parçalar soğuk kalıplama yöntemiyle poliestere gömüldü. Parlatma işlemi yapıldıktan sonra numunelere, (5gr Fe<sub>3</sub>Cl-95ml Etanol-2mlHCl) dağlama reaktifi ile kimyasal dağlama yapıldı. Metalografik gözlemler için PME OLYMPUS optik mikroskobu kullanıldı.

Çekme gerilmesinin etkisini incelemek için X-ışını parça difraksiyonu alındı. X-ışını difraksiyon analizi için Philips ( PW 1352/20 )

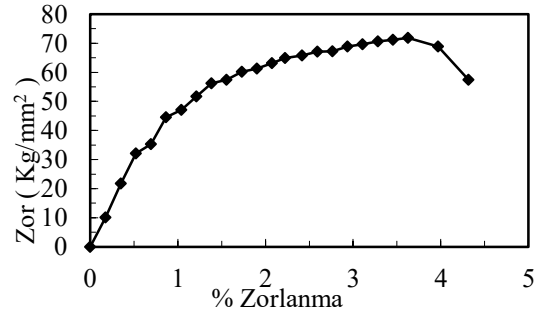
difraktometresi kullanıldı. Analiz için Co-K $\alpha$  radyasyonu kullanılmış olup, ışının dalga boyu 1.788965 Å dur. Alınan difraktogramlar için difraktometrenin tarama hızı 1 °/dakikadır.

Numunelerin ters dönüşüm sıcaklıklarını tayin etmek için SHIMADZU DSC-50 termal analizörü kullanıldı. Bu ölçümlerde ısıtma hızı 5 °/dk olarak seçildi.

## 3. Sonuçlar

### 3.1. Çekme gerilmesi ölçümleri

Isıl işlemler alaşım numunelerine ait bir parça HOUNSFIELD makinasında çekilerek koparıldı. Çekilen boy 29 mm, çekme hızı 5 mm/dk dır. 32.1 kg/mm<sup>2</sup> de akma göstermiştir. Çekilen parça 71.8 kg/mm<sup>2</sup> ye kadar yüklenmiştir. Bu noktadan 57.4 kg/mm<sup>2</sup> ye ani düşüş göstermiştir. 71.8 kg/mm<sup>2</sup> de zorlanma % 3.62 dir. Bu noktadan 57.4 kg/mm<sup>2</sup> ye yük düşüşü gözlenirken zorlanma % 4.31 olmuştur. Alaşıma ait zor-zorlanma eğrisi Şekil 2 de verilmiştir. Elde edilen eğri literatürle uyum içerisindedir [6]. Diğer iki parçaya sırasıyla 63.21 kg/mm<sup>2</sup>, 68.9 kg/mm<sup>2</sup> lik çekme zoru uygulandı.



Şekil 2. Cu-13Al-4Ni alaşımının zor-zorlanma eğrisi.

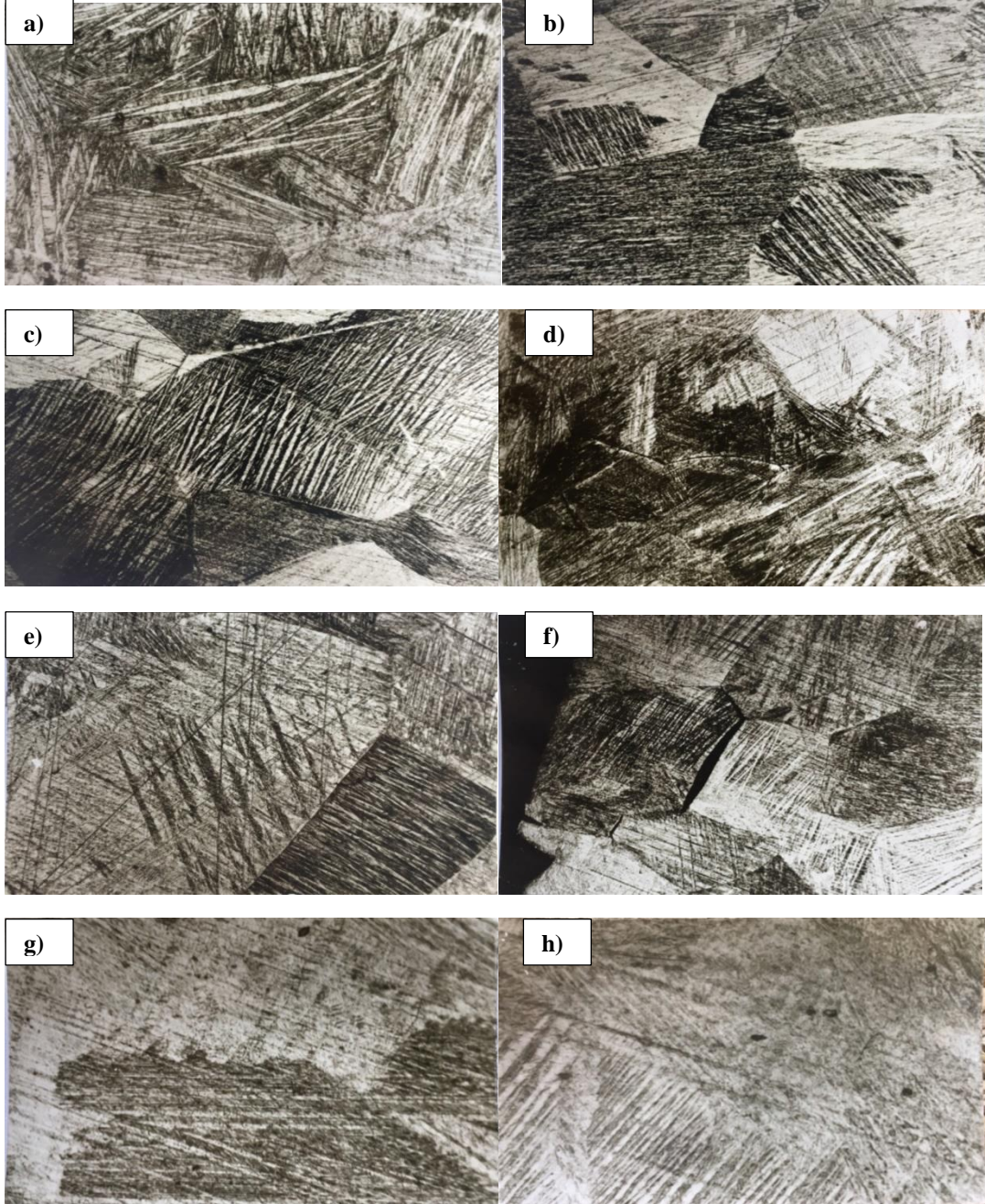
### 3.2. Optik incelemeler

Cu-13Al-4Ni (% ağırlıkça) alaşım numunesine ısıtıl işlem uygulandıktan sonra çekilen yüzey fotoğrafı Şekil 3.a da verilmiştir. Fotoğraftan görüldüğü gibi alaşım numunesi oda sıcaklığında martensit fazdadır. 63.21 kg/mm<sup>2</sup> lik çekme zoru (gerilmesi) uygulanan numunenin yüzey fotoğrafında (Şekil 3.b ve c) açık renkli bölgelerde zor ile martensite dönüşmüş ve dönüşmemiş bölgeler, çökeltiler



ayrıca tane sınırlarında çatlaklar görülmektedir. Aynı görüntüler 68.9 kg/mm<sup>2</sup> çekme zoru uygulanan numunenin yüzey fotoğraflarında da görülüyor ( Şekil 3.d ve e ). 71.8 kg/mm<sup>2</sup> lik çekme zoru altında koparılan numunenin kırık yüzeyinden çekilen yüzey fotoğrafı Şekil 3.f ise

kopma tane sınırlarından ayrılarak gerçekleşmiştir. Zor etkisiyle oluşan martensitler ikizlenerek dönüşmüşlerdir. Ayrıca zora bağlı olarak çökeltiller meydana gelmiştir ( Şekil 3.g ve h).



**Şekil 3.** Alaşım numunesinin yüzey fotoğrafları **a-**) Isıl işlem, x 200 **b-c-**) 63.21 kg/mm<sup>2</sup>, x 50 **d-**) 63.21 kg/mm<sup>2</sup>, x 50 **e-**) 63.21 kg/mm<sup>2</sup>, x 100 **f-**) 71.8 kg/mm<sup>2</sup>, x 50 **g-**) 71.8 kg/mm<sup>2</sup>, x 200 **h-**) 71.8 kg/mm<sup>2</sup>, x 500 lik zor uygulandıktan sonra.

### 3.3. X-Işını difraksiyon analizi

Isıl işlemlerle alaşım numunelerinden birine zor uygulamadan diğerlerine farklı çekme zorları uygulandıktan sonra X- ışını difraktogramları alındı. Bu difraktogramlar Şekil 4 de verilmiştir. Isıl işlemlerle homojen numune oda sıcaklığında tamamen 18R martensit yapıdadır. Diğer homojen parçalara uygulanan farklı çekme zorları sadece yeni piklerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Uygulanan zorlar yapı içinde yeni bir oluşum meydana getirmiştir.

Tablo 1'e bakılacak olursa örgü parametrelerinde büyük bir değişiklik yoktur. a/b oranı homojen parçada ve homojenleştirildikten sonra zor uygulanmış parçalarda  $\sqrt{3}/2$  den küçüktür. Buradan şu sonuca varabiliriz, oda sıcaklığında alaşım numunesine uygulanan çekme zorları numunenin martensit yapısını bozmamıştır.

Bakır bazlı alaşımlarda martensit (110)<sub>β</sub> taban düzlemi üzerine kurulur. Taban düzlemin aynı büyüklükte atomlardan oluşması halinde, taban düzlem eşkenar bir üçgen iç açısı biçiminde olur. Bu nedenle temel düzlemdeki örgü parametrelerinin a/b oranı 18R martensiti için  $\sqrt{3}/2$ , 9R martensiti için  $\sqrt{3}$  olur. Taban düzlemin farklı büyüklükte atomlardan oluşması halinde a/b oranı 18R martensiti için  $\sqrt{3}/2$  den, 9R martensiti için  $\sqrt{3}$  den küçük olur [7].

Şekil 4 de görüldüğü gibi uygulanan zorun büyüklüğüne göre var olan piklerin şiddetleri artarken aynı zamanda yapı içerisinde yeni difraksiyon veren düzlemlerde ortaya çıkmıştır. Bunun yanı sıra (320) (130) (226) (137) pikinin yok olduğu görülmektedir.

**Tablo 1.** Cu-13Al-4Ni alaşım numunelerinin X-ışını parça difraktogramlarından hesaplanan 18R martensit yapının örgü parametreleri

Zor (kg/mm <sup>2</sup> )	18R Yapı
-----	a = 4.43 Å b=5.30 Å c= 38.14 Å β = 89.24°
63.21	a = 4.41 Å b=5.28 Å c= 38.06 Å β = 89.65°
68.9	a = 4.43 Å b=5.32 Å c= 38.06 Å β = 87.60°
71.8	a = 4.43 Å b=5.29 Å c= 38.10 Å β = 89.00°

### 3.4. Diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) ölçümleri

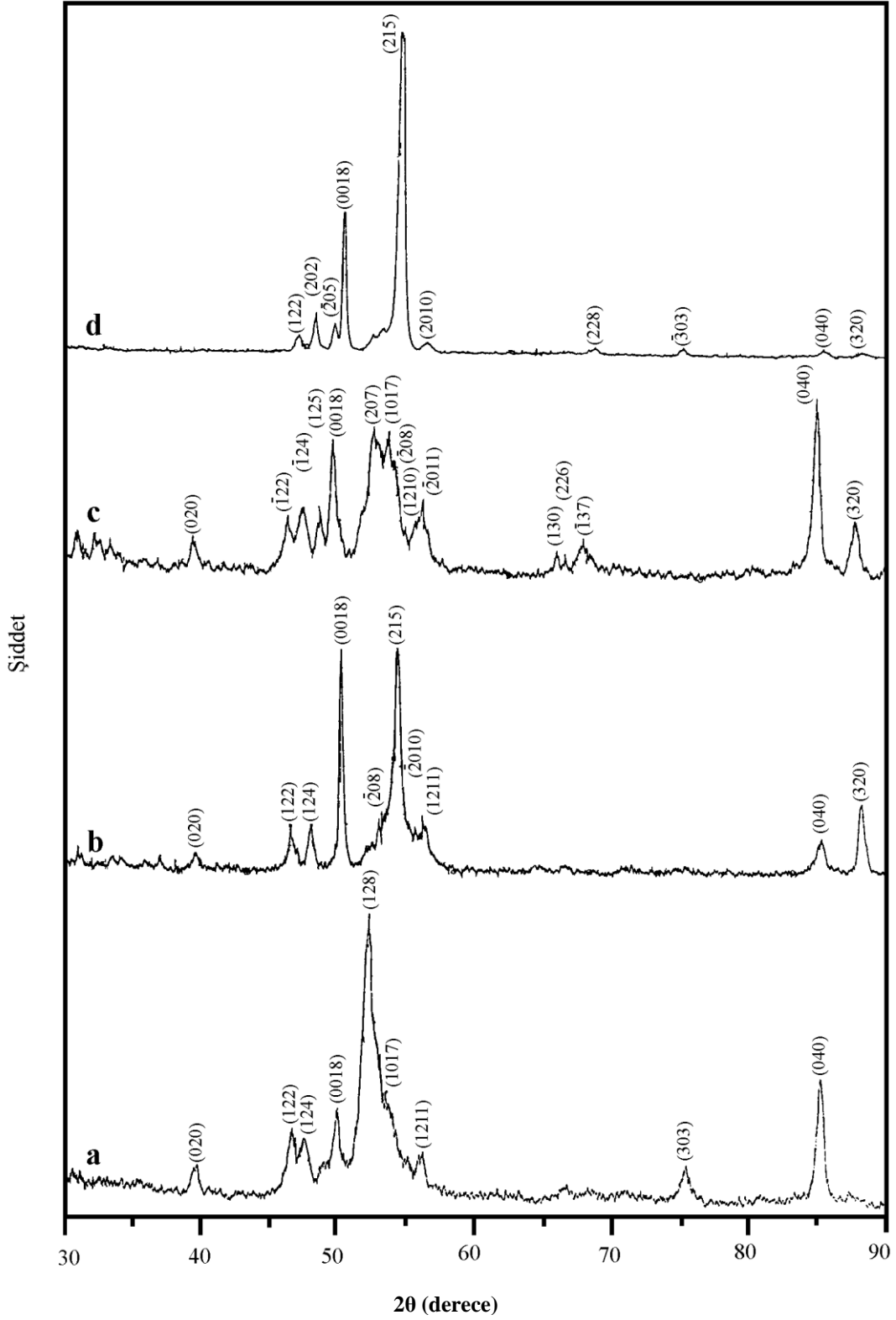
Isıl işlemlerle CuAlNi (% ağırlıkça) alaşım numunesinin DSC eğrisi Şekil.5.a da görülmektedir. Homojen numunenin ters dönüşüm sıcaklıkları A<sub>s</sub> ve A<sub>f</sub> sırasıyla 155 °C ve 188 °C dir. Isıl işlemlerle diğer alaşım numunelerine çekme testi uygulandı. Bunlara ait DSC eğrileri Şekil.5.b-c ve d görülmektedir. Uygulanan zor ile ters dönüşüm sıcaklıkları artmıştır. Ters dönüşüm sıcaklıklarındaki bu artışın germe zoru ile arttığı ayrıca kopan numunede ana fazın bozulmadığı ve ters dönüşüm sıcaklıklarının A<sub>s</sub> ve A<sub>f</sub> sırasıyla 165 °C ve 213.1 °C olduğu Şekil 5.d de görülmektedir.

Zor değeri yükselirse, daha fazla kusurlar ortaya çıkar ve M<sub>s</sub> ve A<sub>f</sub> sıcaklıkları artar. Ancak bu artış aldatıcıdır. Bunun nedeni numunenin, kararlı martensitin büyük miktarını ihtiva etmesidir. Yeniden dönüşebilen martensit fazı ara yüzey büyümesi ile martensit plakalarının kaybolması arasındaki sürtünme kuvvetleri nedeniyle ortaya çıkan dislokasyon dizilerini yenmelidir. Bu işlem dislokasyonların bir zor eksenine ile ilişkili tercihlili bir yönelime kendiliklerinden uyum sağladıkları zaman plakalar arasındaki etkileşimlerde de geçerlidir [8,9].

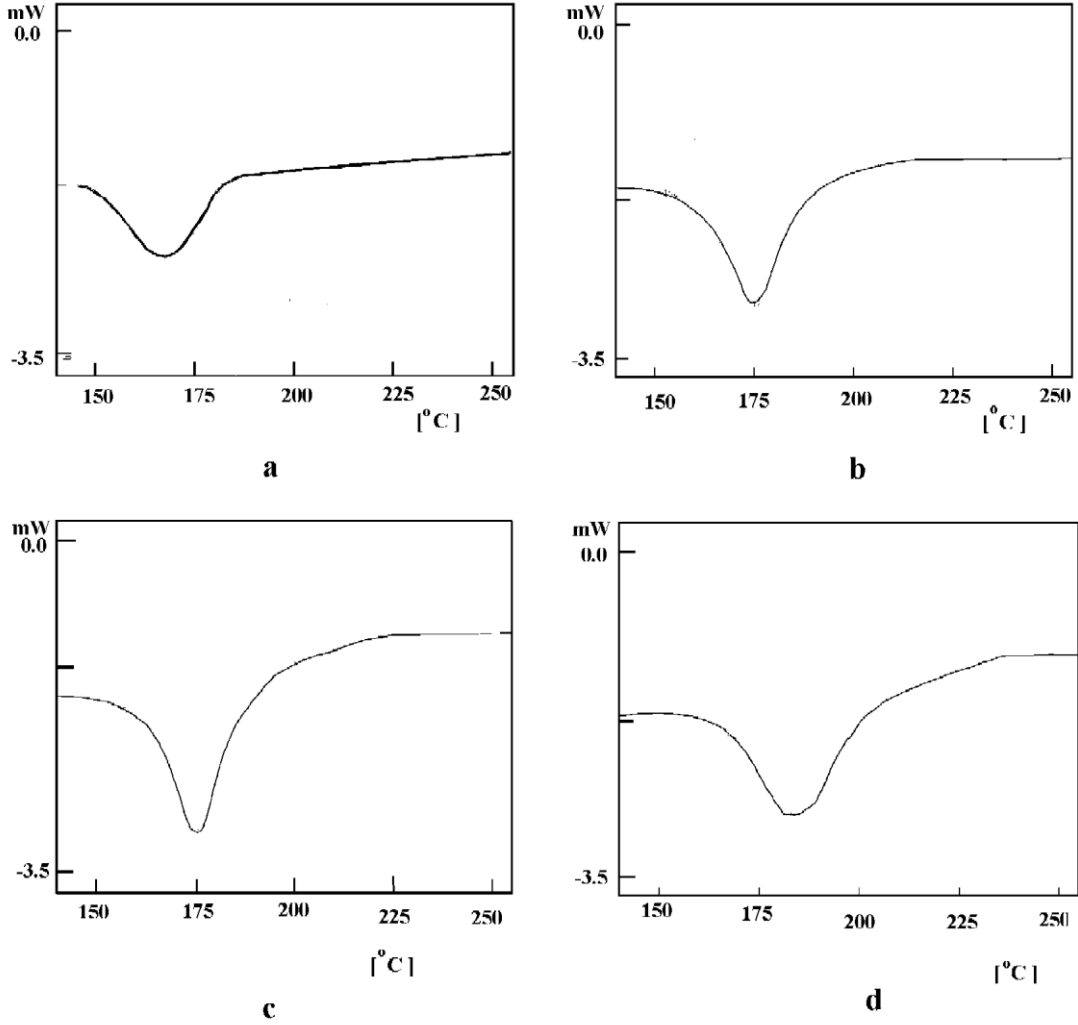
Bu gerçekler ters dönüşüm sıcaklık artışı da beraberinde getirir. Daha yüksek histerisis sıcaklık değerleri büyük zor seviyelerinde elde edilir ve bu dönüşümdeki sürtünme enerjisinin büyük olabileceğini gösterir [9].

## 4. Tartışma

Çekme gerilmesi uygulanan alaşım numunelerinin optik mikroskop fotoğraflarında zor etkisiyle oluşan çökelti fazları görülmektedir. Ayrıca uygulanan zorun büyüklüğüne bağlı olarak meydana gelen kopma ve kırılmaların gevrek kırılma ve tane sınırı kopması olduğu belirlendi.



Şekil 4. X-ışını parça difraktogramları a-) Isıl işlem, b-) 63.21 kg/mm<sup>2</sup>, c-) 68.9 kg/mm<sup>2</sup>, d-) 71.8 kg/mm<sup>2</sup> lik çekme zoru uygulandıktan sonra.



**Şekil.5.** Farklı büyüklüklerde çekme zoru uygulanan alaşım numunelerinin diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) eğrileri **a-** Isıl işlem, **b-** 63.21 kg/mm<sup>2</sup>, **c-** 68.9 kg/mm<sup>2</sup>, **d-** 71.8 kg/mm<sup>2</sup> lik çekme zoru uygulandıktan sonra.

Cu-13Al-4Ni (% ağırlıkça) alaşım numunesi homojenleştirildikten sonra elde edilen difraktogramdaki difraksiyon pikleri indislendiğinde numunenin süper örgü yansıması gösterdiği ve bu alaşımın, martensit fazının 18R kristal yapısında olduğu belirlendi. Bu sonuçtan, numunenin ana fazdan martensit faza dönüşümünün  $DO_3 \rightarrow M18R$  şeklinde olduğu sonucuna varıldı. Bu sonuç literatürlerle uyum içindedir [10].

Homojen alaşım numunelerinden alınan X-ışını parça difraktogramlarından M18R monoklinik yapının örgü parametreleri Tablo 1

de verilmiştir. Bu sonuçlardan alaşım için a/b oranı,  $\sqrt{3}/2$  den küçük çıkmaktadır.  $\beta$ -faz alaşımlarında martensit faz için a/b oranının  $\sqrt{3}/2$  den küçük olması ve piklerin ayrı ayrı çıkması düzenliliğin bir ölçüsüdür [7,11]. Elde edilen bu sonuçlardan alaşımların martensit fazda ve dolayısıyla austenit fazda da düzenli bir kristal yapıya sahip oldukları belirlendi [7].

Ayrıca  $\beta$  açısı  $90^\circ$  den küçük çıkmıştır. Buradan da alaşımların ortorombik distorsiyona uğramadığı anlaşıldı.

Cu-13Al-4Ni (% ağırlıkça) alaşım numunelerine ait homojen parçalara farklı

büyükliklerde çekme zoru uygulandığında 18R martensit yapısına ait X-ışını parça difraktoğramında yeni piklerin meydana geldiği görülmektedir. Alaşım numunelerine uygulanan farklı büyüklükteki çekme zorlarının a/b oranını değiştirmedeği belirlendi. Alaşım için  $T < A_s$  sıcaklığında uygulanan farklı büyüklükteki çekme zorlarının alaşımların ana fazını dolayısıyla martensit fazlarını bozmadığı belirlendi.

Martensit fazda bulunan alaşım numunelerine dışarıdan uygulanan zorların ters dönüşüm sıcaklıklarını yükselttiği belirlendi.

Cu-13Al-4Ni (% ağırlıkça) alaşım numunelerine  $T < A_s$  sıcaklığında farklı büyüklükte uygulanan çekme zorlarından sonra alınan DSC eğrileri Şekil 5 de görüldüğü gibi kopan numunede dahi ters dönüşüm sıcaklıkları varlığını korumaktadır. Ters dönüşüm sıcaklıkları endotermik bir reaksiyonla olmaktadır. Elde edilen bu sonuçlardan  $T < A_s$  sıcaklığında bu numunelere uygulanan çekme zorlarının şekil hatırlama özelliğini kaybettirmediği ve elastik özellik sergilediği belirlendi.  $T < A_s$  sıcaklığında numuneyi deforme edip yüksek bir sıcaklığa ısıtma ile numune deformasyon öncesi şeklini alır.  $T < A_s$  sıcaklığında zorun ortadan kaldırılması durumunda numune elastik olarak kendine gelir fakat zorlanma ilk haline geri dönemez. Bu sonuç literatürlerle uyum içerisindedir [12,13]. Alaşıma uygulanan çekme zorlarında ters dönüşüm sıcaklığı varlığını koruyarak elastik davranışın sergilendiği belirlendi.

## 5. Kaynaklar

1. Shimizu, K., ve Tadaki, T., (1984). Shape Memory Alloys Edited By Funakubo, H., Gordon and Breach Science Publishers, pp.1
2. Parveen Kumar, Sindhu Kumar., (2014). National Conference on Synergetic Trends in Engineering and Technology (STET-2014) International Journal of Engineering and Technical Research ISSN: 2321-0869, Special Issue
3. Adıgüzel, O. ve Ceylan, M., (1988). Shape Memory Phenomena in Noble Metal Copper Based Alloys. J. Inst. Sci. Techn. Gazi Üniv. , **1(1)**: 35-41
4. Huadong Fu , Sheng Xu, Huimin Zhao, Hongbiao Dong, Jianxin Xie.,(2017). Cyclic stress-strain response of directionally solidified polycrystalline Cu-Al-Ni shape memory alloys. Journal of Alloys and Compounds **714**: 154-159
5. Shelyakov, A V., Sitnikov, N N., Sheyfer. D V., Borodako, K A., Menushenkov. A P., Fominski, V Yu., (2015). The formation of the two-way shape memory effect in rapidly quenched TiNiCu alloy under laser radiation Smart Mater. Struct. **24**: 115031 1-7
6. Qingfu, C. , Hurtado, I., Stalmans, R. ve Van Humbeeck, J., (1995). Stabilisation of Martensite Duering Training of Cu-Al-Ni Single Crystals Journal De Physique IV Colloque C2,5, 181-186
7. Xuan, Q., Bohong, J. Hsu, T. Y., (1987). The Effect of Martensite Ordewring on Shape Memory Effect İn a Copper-Zinc-Aluminium Alloy. Meterials Scienc and Engineering, **93**: 203-211
8. Delaey, L., Krishnan, R.V., Tas, H. ve Warlimont, H., (1974). Thermoelasticity, Pseudoelasticity and the Memory Effects associated with Martensitic Transformations, Part1, Journal Of Materials Science, **9**: 1521-1535
9. Gil, F. J ve Guilemany, J. M., (1991). The Influence of Stress-Stabilized Martensite on the Martensitic Transformation in Cu-18.10Zn-7.44Al Shape-Memory Single Crystals by Compression Tests. Journal Of Materials Science letters, **10** :1016-1018
10. Morris, M.A., ve Lipe, T., (1994) Microstructural Influence of Mn Additions on Thermoelastic and Pseudoelastic Properties of Cu-Al-Ni Alloys. Acta Metall., 42, 5, 1583-1594
11. Adıgüzel, O., (1989). Observation of Agening Effect in a Shape Memory CuZnAl Alloy Turkish Journal of Physics, **13**: 171-179
12. Barret, C.S. ve Massalski, T.B. (1982). Structure of Metals, Pergaman Press, Oxford.
13. Wayman, C. M. ve Duering, T.W., (1990). An Introduction to Martensite and Shape Memory. Engineering Aspects of Shape Memory Alloys Edited By DUERING, T. W., MELTON, K. N., STOCKEL, D. And WAYMAN, CMS Butter worth - Heinemann Ltd.



## Katalizör Olarak Katılan Bor Oksit ve Borik Asidin Polyester Üzerindeki Etkilerinin Mekanik ve Mikroyapı Açısından İncelenmesi

Yahya TAŞGIN

Munzur Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, 62000 TUNCELİ  
yahyatasgin@munzur.edu.tr

(Geliş/Received:10.06.2018; Kabul/Accepted:02.07.2018)

### Özet

Bu çalışmada kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılan polyester malzemelere, ülkemiz için çok öneme sahip bor elementinin türevleri olan ve üretimini yaptığımız bor oksit ve borik asidin ( $H_3BO_3$ ) polyester malzemeye farklı oranlarda ilavesinin, genel yapısını ve mekanik özellikleri nasıl etkilediği araştırılmıştır. Yedi farklı bileşim kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler; polyester, %5-10-20 ilaveli bor oksit ( $B_2O_3$ ) ve %5-10-20 ilaveli borik asit ( $H_3BO_3$ ) kullanılarak oluşturulmuştur. Daha sonra elde edilen bu numunelerin iç yapıları metalografik olarak incelenmiş ve yapılarındaki farklılıklar tespit edilmiştir. Üretilen numunelerin mukavemetlerinin belirlenmesi amacı ile çekme testine tabi tutulmuştur. Yapılan değerlendirmeler sonucunda numunelerde  $B_2O_3$  miktarı arttıkça mukavemet değerinin arttığı,  $H_3BO_3$  arttığında ise mukavemet dayanımının azaldığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Polyester, Katalizör, Bor Oksit, Borik Asit ( $H_3BO_3$ ), Mikroyapı.

### The Investigation of the Effects of Boron Oxide and Boric Acid, Added As Catalyst, on Polyester in terms of Mechanical Properties and Microstructure

#### Abstract

In this study, it was investigated how the addition of the boron oxide and boric acid ( $H_3BO_3$ ) which we produce and are derivatives of the boron element, that has great importance for our country, in the polyester materials, commonly used in composite production, at different rates affected their general structure and mechanical properties. The samples were prepared using seven different compositions. These samples were formed by adding 5-10-20% boron oxide ( $B_2O_3$ ) and 5-10-20% boric acid ( $H_3BO_3$ ) into polyester. Then, the internal structures of these samples were examined metallographically and the differences in their structures were determined. In order to determine the strength of the samples, the tensile, compression and three-point bending tests were performed. As a result of the evaluations, it was determined that as the  $B_2O_3$  amount increased in the samples, the strength value increased; as the  $H_3BO_3$  increased, the resistance strength decreased.

**Key Words:** Polyester, Catalyst, Boron Oxide, Boric Acid ( $H_3BO_3$ ), Microstructure.

#### 1. Giriş

Literatürde birçok metal tozu değişik plastik malzemelere eklenerek yeni kompozit yapı elde edilmektedir. Fakat hangi metal tozunun hangi plastik malzemeye hangi oranlarda eklenmesi konusunda literatürde bazı çalışmalar yapılmış olsa da, her bir karışım oranlarında farklı özellikler elde edildiğinden araştırmacıların yoğunlaştığı alanlardan biri olmuştur. Metal tozu ile takviyelendirilmiş polimer esaslı kompozitlerin akış özelliği, mekanik, ısı, elektrik vb. gibi birçok özelliği değişmektedir.

Bu özellikler, polimer içerisine katılan metal tozunun katkı oranı, boyutu ve yapı içerisindeki dağılımına ve üretim şekline bağlı olarak değişmektedir.

Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla malzemenin makro düzeyde bir araya gelerek daha iyi özelliklerde oluşturdukları yeni malzemedir [1]. Gelişen teknoloji ile birlikte farklı ve daha iyi özelliklerde malzeme ihtiyacı da artmaktadır. Kompozit malzemeler son yıllarda başta otomotiv ve havacılık sanayi olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Mevcut malzemelere oranla

daha yüksek mekanik dayanım, aşınma direnci, yorulma dayanımı, ısı dayanım ve korozyon dayanımına sahip olmaları tercih edilmelerinde etkili olmaktadır [2].

Metal esaslı kompozitler; toz metalurjisi, sıcak haddeleme, difüzyonla birleştirme gibi katı hal işlemleri ve karıştırmalı döküm, basınçlı döküm, sıkıştırılmalı döküm, infiltrasyon ve püskürtme çökmesi gibi sıvı hal işlemleri yöntemleriyle üretilirler [3]. Dünya üzerinde bulunan en genel kompozit malzemeler olan ağaç ve kemik doğal kompozit malzemelerdir. Diğer taraftan kompozit malzemeler, havacılık sanayinde, taşımacılıkta, yapı malzemeleri endüstrisinde, gemi yapımı endüstrisinde, korozyona dayanıklı ekipman yapımında, elektrik ve elektronik sektöründe, çok sayıda spor ekipmanında ve malzemesinde, tarımda, balıkçılıkta ve mekanik üretim sistemleri olmak üzere çok sayıda endüstride sahip olduğu üstün özellikler nedeniyle kullanım alanı bulmaktadır [4-5].

Plastikler mekanik, ısı, elektrik, sürtünme ve aşınma boyutsal kararlılık vb. gibi özelliklerinin artırılması için metal tozu ile takviyelendirilmektedir [6-7]. Literatürde birçok metal tozu değişik plastik malzemelere eklenerek yeni kompozit yapı elde edilmektedir. Fakat hangi metal tozunun hangi plastik malzemeye hangi oranlarda eklenmesi konusunda literatürde bazı çalışmalar yapılmış olsa da, her bir karışım oranlarında farklı özellikler elde edildiğinden araştırmacıların yoğunlaştığı alanlardan biri olmuştur. Metal tozu ile takviyelendirilmiş polimer esaslı kompozitlerin akış özelliği, mekanik, ısı, elektrik vb. gibi birçok özelliği değişmektedir. Bu özellikler, polimer içerisine katılan metal tozunun katkı oranı, boyutu ve yapı içerisindeki dağılımına ve üretim şekline bağlı olarak değişmektedir. Metal tozu katkılı plastiklerin kalıplanması ya da şekillendirilmesi sırasında akış özelliklerinin önceden bilinmesi son derece önemlidir [8].

Mamunya ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada iletken polimer kompozitler de dolgu maddesi olarak kullandıkları metal tozlarının (bakır, nikel, demir) elektrik iletkenliği ve basıncın etkisini araştırmışlardır. PP içerisine katılan metal tozlarının büyüklüğü ve metal tozların yüzeyindeki oksit tabakasının iletkenliği etkilediği belirlemiştir [9]. Rusu ve

arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada HDPE (High Density Polyethylene)/Çinko toz kompozitlerinin mekanik ve termal özelliklerini incelemiştir [10]. Bu çalışmaya göre, HDPE içerisine % 0-20 oranında çinko tozu katılmış olup kompozit mekanik özellikleri çinko tozunun katılması ile takviyesiz yüksek yoğunluklu polietilene göre azaldığı tespit edilmiştir. PVC içerisine alüminyum tozu takviye edilerek elde edilen kompozitin mekanik ve elektriksel özellikleri Bishay ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır [11].

Bor bileşiklerinin yeni üretim tekniklerinin ve yeni kullanım alanlarının araştırılması ve geliştirilmesi konularında bilimsel ve teknolojik çalışmalar devam etmektedir. Amorf bor, kristalin bor, bor karbür, hegzagonal ve kübik bor nitür ve bor alaşımları (ferro bor, nikel bor, kobalt bor) üretim teknolojileri geliştirilen başlıca bor bileşikleri arasındadır [12].

Bor minerallerinden  $H_3BO_3$  sülfürik asit ve nitrik asit kullanılarak elde edilir. En çok kullanılan sülfürik asittir. Üretim reaksiyonlarından sırasıyla tinkal borik asit ( $Na_2B_4O_7$ ), sodyum pentaborat borik asit ( $Na_2B_4O_7$ , kolemanit borik asit ( $Ca_2B_6O_{11}$ ), kolemanit borik asit ( $Ca_2B_6O_{11}$ ) reaksiyonları Tablo 1’de (reaksiyon 1-4) gösterilmiştir.

$H_3BO_3$  kolemanitten üretilmektedir. Kolemanit çeneli kırıcılarda 35-50 mm’ye ve sonra çekiçli kırıcıda 10 mm’ye kadar kırılarak, bilyeli değirmende 1 mm’ye kadar öğütülür. Karıştırıcı bir reaktörde %92,5’lik  $H_2SO_4$ ’le 95°C’de reaksiyona girer. Reaktörden alınan reaksiyon karışımı filtreden süzülerek, oluşan jips süzüntüden ayrılır. Derişik süzüntü, kristallendiricide 30°C’ye kadar soğutulup, kristallendirilir. Magma santrifüjlenerek, çözültüden ayrılır. Çözelti reaktöre pompalanırken, santrifüjden alınan nemli kristaller kurutucuda kurutulur [13].

Bor oksit ( $B_2O_3$ ),  $H_3BO_3$  ün dehidrasyonundan elde edilir.  $H_3BO_3$  100°C ye kadar yavaşça ısıtıldığında bir mol su kaybederek metaborasidine ( $HBO_2$ ), ısıtmaya devam edildiğinde 140°C de bir mol su daha kaybederek pro veya tetrabor asidine ( $H_2B_4O_7$ ) ve nihayet ısıtma şiddetlendirildiğinde kızıl derecede suyunu tamamen kaybederek bor



triokside ( $B_2O_3$ ) dönüşür. Tablo 1’de (reaksiyon 5-7) gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Üretim reaksiyonları

No	Reaksiyon
1	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O + H_2SO_4 \rightarrow Na_2SO_4 + 4H_3BO_3 + 5H_2O$
2	$Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O + H_2SO_4 \rightarrow Na_2SO_4 + 4H_3BO_3$
3	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O + H_2SO_4 + 6H_2O \rightarrow 2CaSO_4 \cdot 2H_2O + 6H_3BO_3$
4	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O + 4HNO_3 + 2H_2O \rightarrow 6H_3BO_3 + 2Ca(NO_3)_2$
5	$H_3BO_3 \rightarrow HBO_2 + H_2O (100^\circ C)$
6	$4HBO_2 \rightarrow H_2B_4O_7 + H_2O (140^\circ C)$
7	$H_2B_4O_7 \rightarrow 2B_2O_3 + H_2O$ (Kızıl derece)

Sarıbıyık ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada kuvars takviyeli polimer kompozitlerde kuvarsın yerine %10, %20, %30, %40 ve %47 oranlarında atık cam tozu kullanımının basma ve eğme mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Atık cam tozu miktarının artışıyla eğme ve basma mukavemeti artmıştır. Reçinenin viskozitesine, partiküllerin şekline, boyutuna ve miktarına bağlı olarak kompozitin proses edilebilirliği değişmiştir [14]. Dong ve Davies, fındık kabuğunu dolgu elemanı olarak kullanarak (ağ. %10, 20, 30 ve 40) polyester matrisli kompozitlerin eğme dayanımına etkisini araştırmışlardır. Proses kaynaklı gözeneklerin oluşumu ve eğme dayanımına olumsuz etkisi olduğunu belirlemişlerdir. Gözenek içeren numunelerin eğme dayanımları mikro-mekanik modele göre hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar ve teorik hesaplanan eğme dayanımları değerlerinin dolgu elemanı miktarı arttıkça arttığı ve gözenek miktarı arttıkça azaldığı görülmüştür [15].

Doğal ya da yapay organik ve inorganik atıkların takviye/dolgu elemanı olarak polimer matrisli kompozit ürünlerin üretimine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Daha önceki çalışmalarımızda porselen, bor, ürefoaldehyt, uçucu kül ve mermer tozu atıklarının miktarları ve tane boyut dağılımlarının mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi epoksi ve polyester matrislerde kullanımı gerçekleştirilerek araştırılmış, farklı teknikler ile yapı özellik ilişkileri değerlendirilmiştir [16-17].

Bu çalışmada kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılan polyester malzemelere, yedi farklı bileşim kullanılarak numuneler

hazırlanmıştır. Bu numuneler; polyester, %5-10-20 ilaveli  $B_2O_3$  ve %5-10-20 ilaveli  $H_3BO_3$  kullanılarak oluşturulmuştur. Daha sonra elde edilen bu numunelerin içyapıları metalografik olarak incelenmiş ve yapılarındaki farklılıklar tespit edilmiştir. Üretilen numunelerin mukavemetlerinin belirlenmesi amacı tahribatlı muayene testlerine tabi tutulmuştur.

## 2. Materyal ve Method

### 2.1. Kompozit üretiminde kullanılan malzemeler

Üretim esnasında katalizör olarak Türkiye ETİ maden işletmesinde üretilen ( $B_2O_3$ ) ve ( $H_3BO_3$ ) kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak ise 200 ml polyester,  $200 \times 0.04 = 8$  ml Nutanox M-50 sertleştirici,  $200 \times 0.06 = 12$  ml Akcobalt CX1-6 kobalt (hızlandırıcı) dan oluşan toplamda  $200+8+12=220$  ml karışım kullanılmıştır. (Tablo 2, Tablo 3).

**Tablo 2.** Matris malzemesi

Polyester	200 ml
Sertleştirici	8 ml
Hızlandırıcı	12 ml
Toplam	220 ml

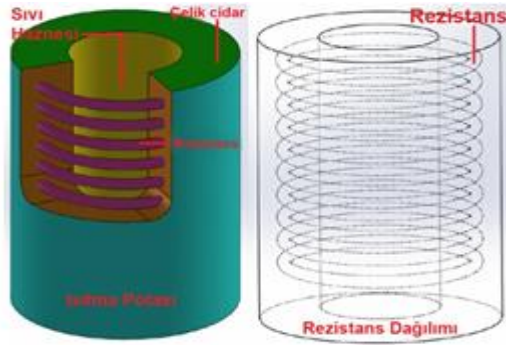
**Tablo 3.** Katalizör

$B_2O_3$	%5	%10	%20
$H_3BO_3$	%5	%10	%20

### 2.2. Deney numunelerinin imalat aşamalar

Katalizör olarak katılan ( $B_2O_3$ ) ve ( $H_3BO_3$ ), matris malzemesi içerisinde homojen dağılırarak daha etkili olabilmesi için, maksimum ısı dayanımı  $204^\circ C$  olan polyestere katılması ve istenilen yapıyı oluşturabilmesi için % 1 oranında ilave edilen Akcobalt CX1-6 kobalt (hızlandırıcı) ve Nutanox M-50 sertleştiricinin de etkisiyle  $80^\circ C$  lik bir ısı ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada matris malzemesi (polyester) bünyesinde istenmeyen boşlukların (hava kabarcıklarının) giderilmesi hem de katalizörün etkisini artırmak için çalışmanın  $130-140^\circ C$  lik bir çalışma ortamının oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışmaya yardımcı olacak

düzenek; Şekil 1’ de görülmekte olan çelik ısıtma potasıdır. Yüksek karbonlu çelikten yapılmış olan bu kap 20 mm cidar kalınlığına sahip ve iç kısmından geçen 2000 w lık rezistanslarla çepeçevre sarılmış, 600 ml malzeme alma kapasitesine sahip bir deney aparatıdır. Çelik deney setinin en alt kısmında rezistansın geçmesi gereken kısım iptal edilerek, setin ısısını istenilen derecede tutabilmek için bir termostat yerleştirilmiştir.

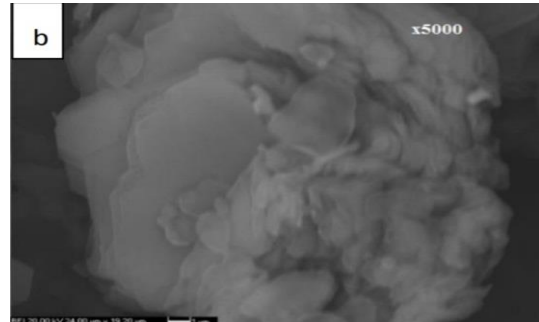
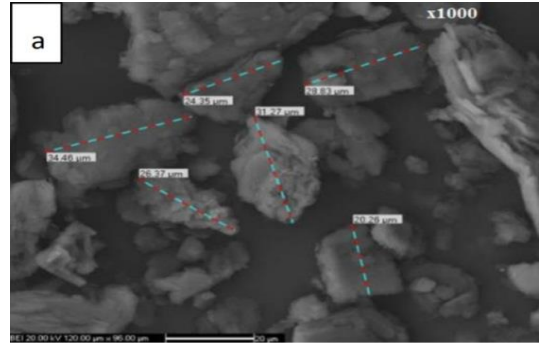


**Şekil 1.** Üretimde kullanılan ısıtma potasının çalışma sistemi ve rezistanslarının sistem içerisindeki dağılım

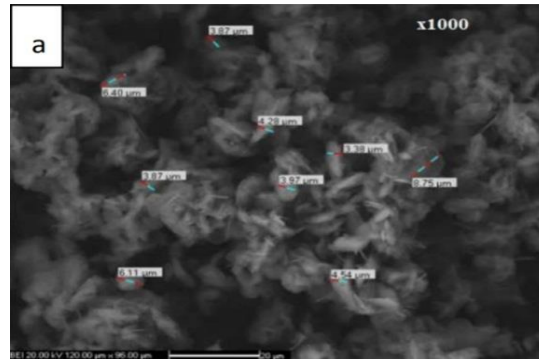
Deney numunelerinin imalatı için hazırlanmış olduğumuz ısıtma potası (Şekil 1) kontrol edilerek 80°C lik sabitleme sıcaklığının sağlanıp sağlanmadığı görmek için termostatlara kontrollerinin yapılmasının ardından, matris malzemesi polyesterin her bir numune için 200 ml ve katalizör olarak katılan B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in % 5 (10 mg), %10 (20 mg) ve % 20 (40mg) miktarlarda hazırlanmıştır. İkinci katalizörümüz olan H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> yine B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de olduğu gibi % 5 (10 mg) ve % 20 (40mg) miktarlarda farklı bölmelere konularak hazırlığın ilk aşaması yapılmıştır. Deney aparatı içerisine 200 ml polyester konularak üretim aşaması başlamış ve deney aparatının 80°C ye kadar polyesterle birlikte çıkması sağlanmıştır. Daha sonra önceden miktarlarını ayarladığımız katalizörlerden %5 (10 ml) B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matris polyester içerisine katılarak homojen bir karışımın sağlanabilmesi için ısıtma potası içerisinde 6 dk karıştırılmıştır. Polyester ve B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in karıştırılmasının ardından 8 ml sertleştirici ilave edilip karıştırılmış ve bir sonraki aşama olan 12 ml kobalt ilave edilip karıştırılarak karışımımız hazırlanmıştır. Hazırlanan karışım, önceden

hazırladığımız silindirik kalıplara dökülerek oda sıcaklığında katılaşması sağlanmıştır. Bu işlem sadece B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranlarının değiştirilmesiyle tekrarlanır, sertleştirici ve kobalt oranları değiştirilmez. İkinci katalizörümüz olan H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> içinde bu işlem tekrarlandı. Yine %5- %10- %20 oranlarında ilave edildi, karışımın homojen ve daha etkili olabilmesi için çok iyi karıştırılması sağlandı. Sertleştirici ve kobalt (hızlandırıcı) oranları B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> deki oranlar ve miktarlar aynen uygulanmıştır. Kalıplar olarak yine silindirik kalıp kullanılmıştır.

### 3.Sonuçlar



**Şekil 2.** H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> ait SEM görüntüleri (a: 1000 büyütme, b: 5000 büyütme) [18].

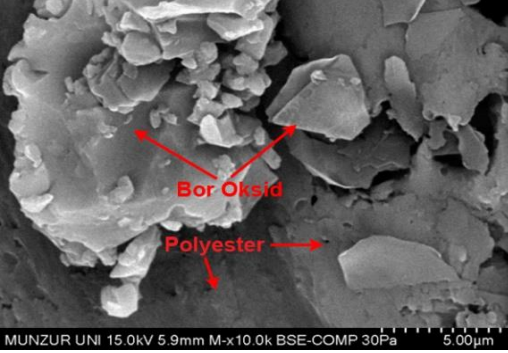


**Şekil 3.** B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ait SEM görüntüleri (a: 1000 büyütme, b: 5000 büyütme) [18]. (devamı)

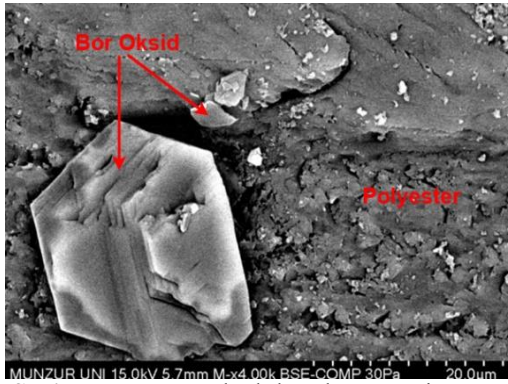


Şekil 3.  $B_2O_3$  ait SEM görüntüleri (a: 1000 büyütme, b: 5000 büyütme) [18].

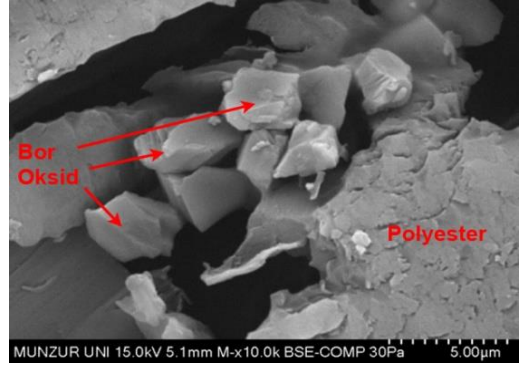
Şekil 4, 5 ve 6'da  $B_2O_3$  katkılı numuneleri metalografik olarak incelediğimiz de katalizör olarak katılan  $B_2O_3$  çözünme şartlarını (ısı ve çözücüler) oluşmadığı için polyester içerisinde çözünmeyip partiküller halinde kaldığı görülmüştür. Polyester bünyesinde bulunan bor oksidin farklı bir görev üslenerek, çeliklerde görülen karbürler ( $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$ ) gibi altıgen ve beşgen köşeli yapıyla malzemenin genelinde aşınmayı engelleyici bir rol üslenmiştir.



Şekil 4. % 5  $B_2O_3$  katkılı polyestere ait SEM görüntüsü

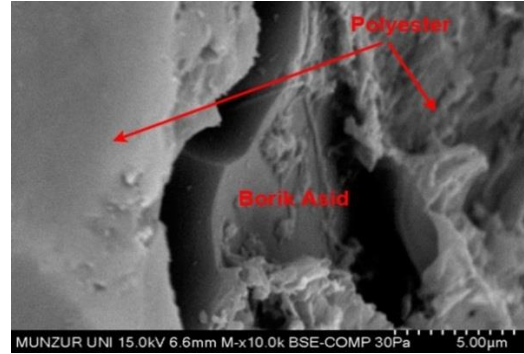


Şekil 5. % 10  $B_2O_3$  katkılı polyestere ait SEM görüntüsü

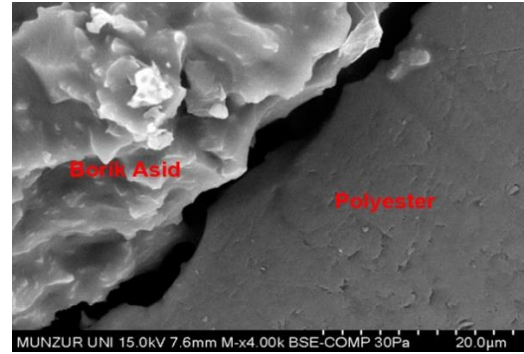


Şekil 6. % 20  $B_2O_3$  katkılı polyestere ait SEM görüntüsü.

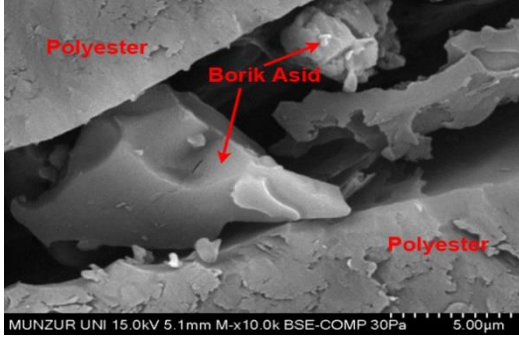
Şekil 7, 8 ve 9'da  $H_3BO_3$  katkılı numunelere ait metalografik numuneleri incelediğimizde; bor oksit de olduğu gibi matris malzemesi olan polyesterin bünyesinde de çözünmediği görülmüştür. Yapılan analizler doğrultusunda  $H_3BO_3$  bor okside göre daha fazla nüfuz ettiği fakat görüntülerin karbürleri benzemediği görülmektedir.



Şekil 7. % 5  $H_3BO_3$  katkılı polyestere ait SEM görüntüsü.



Şekil 8. % 10  $H_3BO_3$  katkılı polyestere ait SEM görüntüsü.

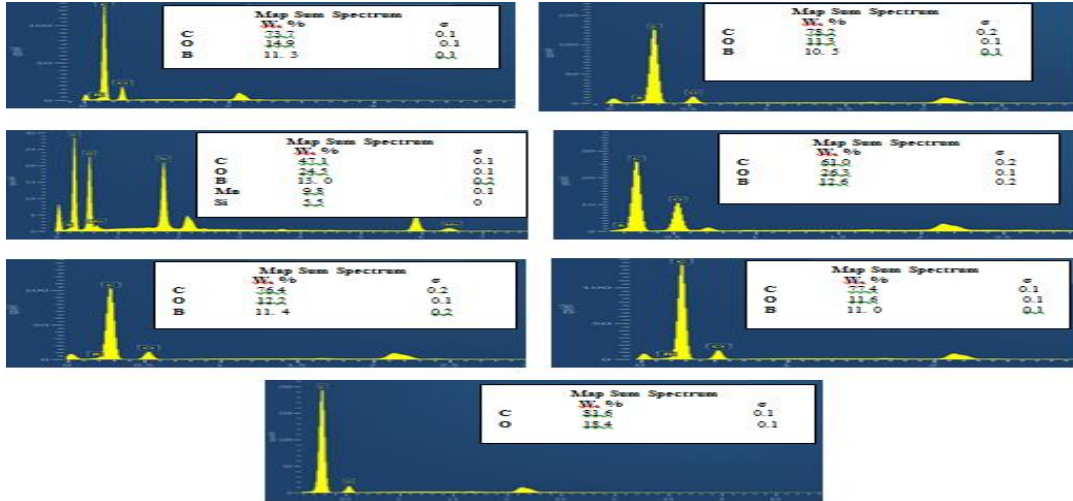


Şekil 9. % 20 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> katkılı polyestere ait SEM görüntüsü

Polyesterle B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin bir birini sararak desteklemesi açısından baktığımızda ise; aslında bor oksit partiküllerinin polyester tarafından her ne kadar çözünmese de bünyesine aldığı makro incelemelerde görülmüştür. Partiküllerle, polyester arasındaki bağı

görebilmek için numunelerin metalografik görüntülerine baktığımızda polyesterle bor oksidin birlikte hareket etmeyerek yapı içerisinde bulunmuyormuş gibi görülmüş matris olarak kullandığımız polyesterin sünek bir malzeme olmasından dolayı, numune hazırlamak için yaptığımız kesme işlemi sırasında partiküllerin etrafını boşaltarak kendilerine bir alan açtıkları görülmüştür.

Katalizörlerin SEM de çekilerek EDS analizlerinin yapıldığı metalografik görüntüler incelendiğinde B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> polyester içerisine gömülerek özellikle krom içerikli çeliklerde görülen karbürler gibi bor oksidinde, karbürlerin hem şeklini hem de aşınmayı engelleyici görevini almıştır. Bu durum H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> için geçerli olmayıp biraz daha yuvarlak partiküller olarak bünyede yer almıştır.



Şekil 10. Yedi farklı numuneye ait (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in % 5 (10 mg), % 10 (20 mg) ve % 20 (40mg) H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> % 5 (10 mg), % 10 (20 mg) ve % 20 (40mg) EDS analiz sonuçları.

### 3.1. Numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi

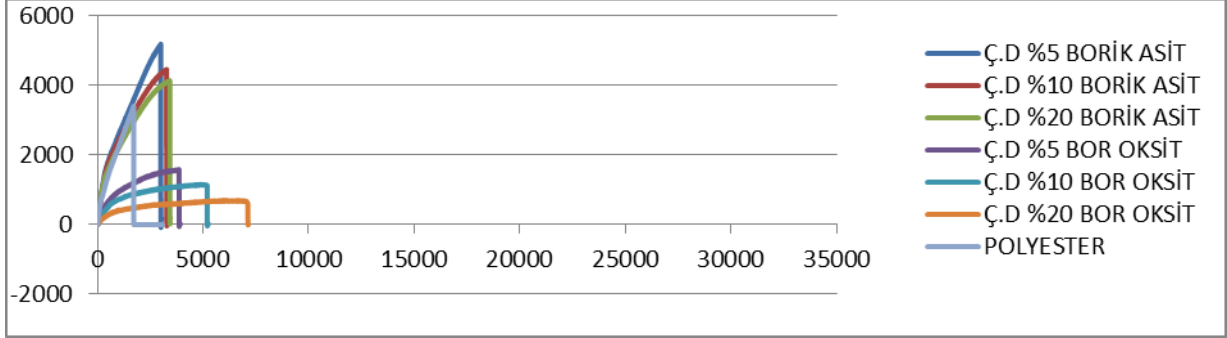
Bu çalışmada üretilen %5-10-15-20 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %5-10-15-20 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> katkılı polyesterlere mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla çekme, basma ve üç noktalı eğilme testleri uygulanmıştır. Bu testler Shimodzu AG-IC 100 kN test cihazında gerçekleştirilmiştir. Test cihazı birbirine göre aşağı ve yukarı hareket edebilen, deney parçasının bağlandığı iki çene ve bunlara hareket ve kuvvet veren, bu iki büyüklüğü zaman mesafe vs. değerlendiren ünitelerden oluşur.

Çenelerden birisi sabit hızda hareket ettirilerek deney parçasına değişken miktarlarda çekme kuvveti uygulanır ve bu kuvvete karşılık gelen uzama ve gerilme kaydedilir.

Şekil 11' de farklı katalizörlerin (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> ve bor oksit) değişik oranlarda katılmasının çekme değerleri nasıl etkilediğine baktığımızda; çekme eğrisinde de görüldüğü gibi % 5 oranında ilave edilmiş H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> in mekanik olarak daha etkili olduğu H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> katkısının artırılmasının (%10-20) çekme dayanımına olumsuz etkilediği görülmüştür. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı numunelerin çekme eğrilerini incelediğimizde ise olumlu yönde

katkısının hiç olmadığı görülmüştür. Polyesterin ise bir ara malzemeymiş gibi yer aldığı  $H_3BO_3$

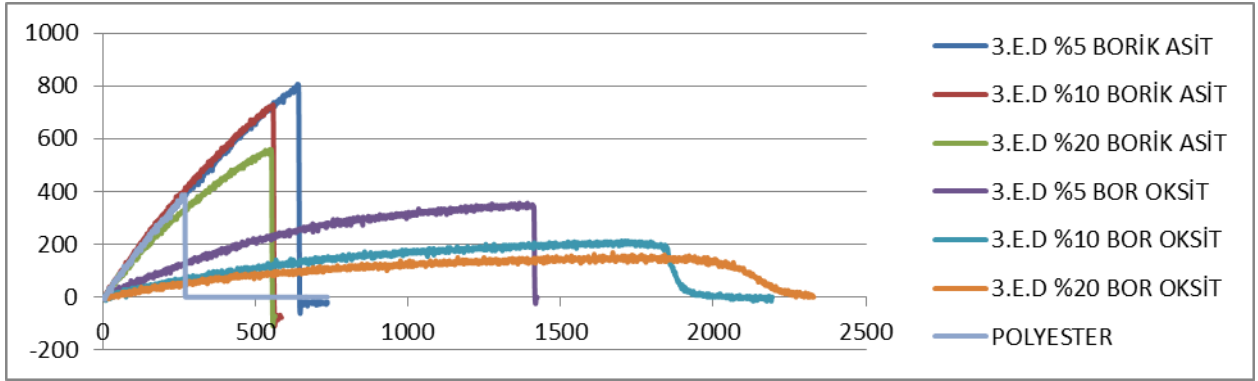
asidin olumlu katkısını ve bor oksidin olumsuz etkileri daha iyi gözlemlene imkanı vermiştir.



Şekil 11. Farklı bileşimdeki numunelere (polyester, %5-10-20  $H_3BO_3$  katkılı, %5-10-20  $B_2O_3$  katkılı) ait çekme eğrisi

Şekil 12' de üç nokta eğme testine tabi tutulan numuneleri incelediğimiz de ise  $H_3BO_3$  ve  $B_2O_3$  numunelerin % 5 in üzerinde ilave edilmesinin fayda yerine zarar verdiği,

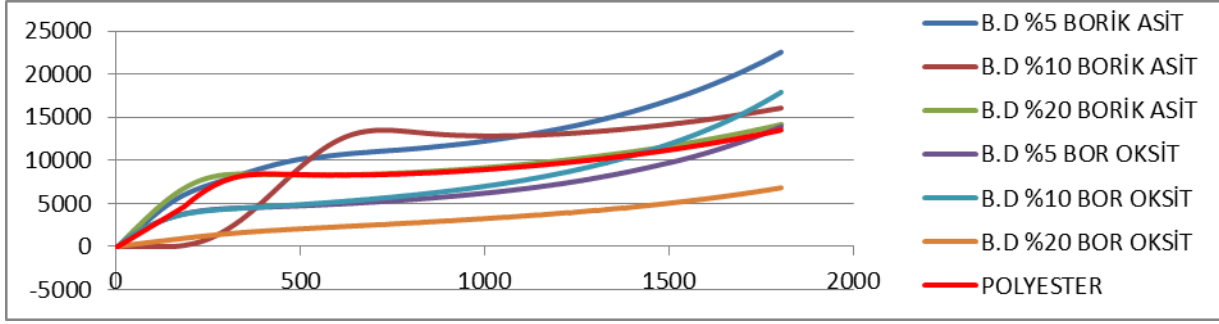
polyestere ilave edilen  $H_3BO_3$  mekanik olarak faydalı olduğu,  $B_2O_3$  in ise yine olumsuz etkileri gözlenmektedir.



Şekil 12. Farklı bileşimdeki numunelere (polyester, %5-10-20  $H_3BO_3$  katkılı, %5-10-20  $B_2O_3$  katkılı) ait üç noktadan eğme testi eğrisi.

Basma testine ait eğrileri şekil 13 de incelerken maksimum basma dayanımı ziyade akma bölgelerini baz aldığımızda  $H_3BO_3$  katkılı numunelerimizin akma bölgesine kadar olan elastik şekil değişim bölgesinin daha fazla olduğu bu durumda malzemenin basma dayanımı yönünden olumlu sonuçlar oluşturduğu

görülmektedir. Maksimum basma dayanımının baz aldığımızda ise malzemenin plastik şekil değişimi sonrası yine  $H_3BO_3$  numunelerin olumlu sonuçlarının yanı sıra, %10  $B_2O_3$  katkılı numunenin de basma dayanımına olumlu yönde etki ettiği görülmektedir.



Şekil.13 Farklı bileşimdeki numunelere (polyester, %5-10-20 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> katkılı, %5-10-20 bor oksit katkılı) ait basma eğrisi

#### 4. Tartışma ve Öneri

Polyester malzemelerde farklı karışım oranlarında farklı fiziksel ve kimyasal özelliklerin elde edilmesi nedeniyle yapılan çalışmalar farklı teknolojik malzemelerin üretimine öncülük etmesi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada katalizör olarak katılan B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> polyester üzerindeki etkileri incelenmiş olup, metalografik ve mekanik özellikleri açısından kullanılabilirliği, avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir.

Katalizör olarak katılan bor ürünlerinin polyestere olan etkisini tespit etmek amaçlı yapılan bu çalışmada, öncelikli hedef polyestere katılma sıcaklığının üzerine çıkarak takviye elamanlarının biraz daha polyesterle etkileşimini arttırmak amaçlı bir ısıtma potası üretilmiştir.

Isıtma pompası, polyesterle katalizörlerin karıştırılması sırasında oluşabilecek hava kabarcıklarını gidererek en ideal numunelerin üretilmesine olanak sağlamıştır.

Bor oksit ve H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, polyester içerisine mikron mertebesinde katıldığı için karışımda ve yapı içerisinde homojen dağılımı sağlanmıştır.

Mekanik test sonuçları incelendiğinde; B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı arttıkça polyestere dayanımın arttığı, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> miktarı arttığında ise dayanımın azaldığı tespit edilmiştir.

Ayrıca kullanılan bor ürünlerinin yalnızca metal malzemelerle birlikte değil plastik malzemelerde de kullanılabileceği gözlemlenmiştir.

Borun diğer minarelerinin polyester üzerine etkileri araştırılarak borun özellikle teknolojik yoğun üretimlerde kullanılması sağlanabilir.

Bu çalışmada yapılan çekme, basma ve üç noktalı eğilme testlerinin yanı sıra yorulma,

aşınma ve iletkenlik katsayılarının araştırılması hususu özellikle de gelişmekte olan kompozit malzeme çalışmalarına katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

#### 5. Kaynaklar

- 1.Sanjay, M.K. (2002). Composites Manufacturing, Materials, Product and Process Engineering, CRC Press, LLC, Florida, 315-326
- 2.Aycan, M. F. (2010). Yaşlandırma Isıl İşleminin SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Parçacık Takviyeli Alüminyum Alaşımı Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 15-19.
- 3.Şahin, Y. (2000). Kompozit Malzemelere Giriş. Gazi Kitabevi, Ankara, 91-134.
- 4.Açıkbaş, G., Göçmez, H. (2017). Polyester Matrisli Kompozit Özelliklerine Vitriye Seramik Sağlık Gereçlerine Atık Miktarının Etkisi. Cilt.5, sayı.3, 138-145.
- 5.Adrian, P.P., Gheorghe, B.M. (2010). Manufacturing Process and Applications of Composite Materials. Fascicle of Management and Technological Engineering, vol.19: NR2.
- 6.Servet, T. (2014). The Determination Of Rheological And Mechanical Properties Of Aluminum Powder Reinforced Polypropylene. Ms.C. Thesis, Gazi University, Graduate School of Natural And Applied Sciences, Ankara.
- 7.Gültaş, A., Temel, S. (2013). Alüminyum Tozu Takviyeli Polipropilenin Takviye Oranına Göre Mekanik Özellikleri. 1st International Symposium on Plastic and Rubber Technologies and Exhibition, Ankara, vol.4, number.3, pp.147-158
- 8.Gültaş, A. (2016). Alüminyum tozu takviyeli polipropilenin viskozite değerlerinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4(3): 147-158.

- 9.Mamunya, Y.P., Zois, H., Apekis, L., Lebedev, E.V. (2004). Influence of pressure on the electrical conductivity of metal powders used as fillers in polymer composites. *Powder Technology*, **140**: 49-55.
- 10.Rusu M., Sofian N., Rusu D. (2001). Mechanical and thermal properties of zinc powder filled high density polyethylene composites. *Polymer Testing*, Vol.**20**: 409-417.
- 11.Bishay, I.K., Abd-El-Messieh, S.L., Mansour, S.H. (2011). Electrical, Mechanical and Thermal Properties of Polyvinyl Chloride Composites Filled with Aluminum Powder, *Material and Design*. Vol **32**: 62–68.
- 12.Sarıbıyık, M., Piskin, A., Sarıbıyık, A. (2013). The effects of waste glass powder usage on polymer concrete Properties. *Construction and Building Materials*, vol.**47**: 840–44.
- 13.Addemir, O. (2002). Bor Ürünlerinin Teknolojileri ve Türkiye'nin Durumu. I. Uluslararası Bor Sempozyumu, Dumlupınar, 15-20.
- 14.Erdoğan, Y. (2001). Borik Asit Fabrikasının Atıklarının Değerlendirilmesi. *K.T.Ü. Fen ve Mühendislik Dergisi*, sayı.**2**: 58-1
- 15.Dong, C., Davies, J.I (2012). Flexural properties of macadamia nutshell particle reinforced polyester composites. *Composites: Part B*, vol. **43**: 2751–56.
- 16.Acikbas, G., Acikbas, N.C., İkizek, E., Özel, M., Eker, A.S. (2014). Characterization of green epoxy matrix composites filled with ceramic wastes. 2nd International symposium on innovative technologies in engineering and science ISITES2014, Karabük Üniversitesi, Karabük, 597–606.
- 17.Pehlivan, T., Akbulut, A., Furat, Ç., Açıkbaş, G., Açıköz, Ç. (2013). Mermer atıkları ve çinko oksit/ külçe pirinç üretim tesisi cürufunun polyester matriksli kompozit malzemelerin özelliklerine etkisi. 2. Ulusal Kimya Mühendisliği Öğrenci Kongresi 2.UKMÖK, Ankara Üniversitesi, Ankara, 103-115.
- 18.Kıpçak, S. (2013). Çeşitli Magnezyum ve Bor Kaynaklarından Farklı Yöntemler ile Yapay Magnezyum Borat Üretimi ve Üretim Parametrelerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, .29.





## Yaşlandırma Süresinin TiNi Şekil Hafızalı Alaşımında Termodinamik Parametreler ve Yapısal Özellikler Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Canan Aksu CANBAY<sup>1</sup>, İskender ÖZKUL<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Elazığ

<sup>2\*</sup>Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin  
iskender@mersin.edu.tr

(Geliş/Received: 22.06.2018; Kabul/Accepted: 07.08.2018)

### Özet

Şekil hafızalı alaşımlar genel olarak termal aktive ile istenilen görevleri yerine getirmektedirler. Bu nedenden dolayı sıcak ortamlarda bulunmak veya bu termal döngülere maruz kalmaları doğal ortamlarını oluşturmaktadır. Bu çalışmada oda sıcaklığının üzerinde karakteristik dönüşüm sergileyen şekil hafızalı TiNi alaşımı kullanılmıştır. TiNi alaşımına 200°C derece sıcaklığında farklı sürelerde yaşlandırma işlemi uygulanarak yaşlandırma süresinin termal ve yapısal özellikleri nasıl etkilediği araştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** TiNi, Şekil Hafızalı Alaşım, Yaşlandırma, DSC

### Investigation of the Effect of Aging Time on Thermodynamic Parameters and Structural Properties of TiNi SMA

#### Abstract

Shape memory alloys perform functions by thermally induced. Because of that, shape memory alloys stay in hot environments or being exposed to these cycles and that can be describe as natural environment for shape memory alloys. In this study, shape memory TiNi alloy, which exhibits characteristic transformation over the room temperature, is used. TiNi alloys were investigated in terms of the effect of aging time on the thermal and structural properties by applying aging at different temperatures at 200 °C.

**Keywords:** TiNi, Shape Memory Alloy, Aging, DSC

#### 1. Giriş

Şekil hafızalı malzemelerin (ŞHA) kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bu nedenden dolayı bu akıllı malzemelerin üzerine çalışmalar hız kesmeden devam etmektedir. ŞHA'lar genel olarak termoelastik bir yapı gösterir ve tersinir bir yapıdadırlar [1-3]. Bu dönüşüm katı hal dönüşümü olarak gerçekleşmektedir ve ana faz yani austenit fazı ile ürün fazı olan martensitik fazı arasında birinci dereceden bir faz geçişi olarak tamamlanır. Metal bazlı şekil hafızalı alaşımlar genel olarak 3 yapı altında oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla nikel-titanyum, bakır ve demir bazlı olmak üzere bu türlerin varyasyonları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu türlerin histeris ve kullanım alanı olarak kendisine çok kısıtlı yer bulan tür demir bazlı ŞHA'dır. Bakır bazlı ŞHA'lar hızla gelişmekte olan ve yakın zamanlarda kullanım alanı olarak hızla bir artış sergileyen bir diğer ŞHA türüdür [4-6]. Ni-

Ti bazlı şekil hafızalı alaşımlar ise bu türler arasında en yüksek değerde özellikleri ve küçük histeris aralıkları sayesinde en sık kullanılan şekil hafıza alaşımlardır. Ni-Ti alaşımının birçok alanda kullanılmasının nedeni, Ni-Ti'nin çoklu tek yönlü şekil hafızası, iki yönlü şekil hafızası veya psödoelastik dönüşüm yetenekleri olmasına dayanır [7, 8]. Ni-Ti, sıcaklıktaki bir azalma veya uygulanan streste bir artış yoluyla kendisini B2 austenit fazından (A), B19' martensit fazına (M) geçiş yapabilmektedir. NiTi'nin kendiliğinden (psödoelastisite) veya sıcaklıkta bir artış (şekil hafızası etkisi) yoluyla büyük gerinimleri geri kazanmasını sağlayan bu katı hal faz dönüşümüdür [9-12]. Ni-Ti alaşımlar aynı zamanda yaşlanmanın neden olduğu iç stresler, tipik olarak, rombohedral R-fazının oluşmasını kolaylaştırır ve bu faz B2 ve B19' faz aralarında geçişlerde meydana gelir. Esasen, çökeltiler ve dislokasyonlar, martensit oluşumuna bir enerji bariyeri oluşturur ve R-fazının oluşumunu düşük

bir enerji değişimi olarak yansıtır. İlk martensitik dönüşüm, B2 ile R fazı arasında gerçekleşir daha sonra oluşan R fazı B19' fazına dönüşmektedir [13-16]. Deneylemede medikal uygulamalardan uzay teknolojileri dahil birçok alanda kendisine yer bulmuş akıllı malzeme cinsi olarak şekil hafıza etkisi gösteren NiTi bazlı ŞHA teli kullanılmıştır [17, 18]. Literatürde NiTi alaşımı için çok yüksek sıcaklıklarda yaşlandırma işlemleri yapılmıştır [12, 19]. Pratik uygulamalarda ise daha az performans beklenen nispeten daha az sıcaklık deplasmanı olan ortamlar bu deney çalışması için seçilmiştir. ŞHA'ın 200°C gibi sergilemiş olduğu dönüşüm sıcaklığının neredeyse 3 katı gibi bir sıcaklıkta farklı sürelerde yaşlandırılması sonucu alaşım üzerinde meydana gelen termal ve yapısal değişimler incelenerek çalışmamızda sunulmuştur.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada 0.8 mm çapında ticari polikristal TiNi teli kullanılmıştır. Telin kimyasal bileşimi, enerji yayımlı X-Işını analizi cihazı ile incelenerek Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** NiTi alaşımının kimyasal kompozisyon analiz sonuçları

Element	ağ. %	at. %	e/a
Ti	54.27	59.27	
Ni	45.73	40.73	6.44

Deneylemede 200°C yaşlandırma işlemi için 5 farklı yaşlandırma süresi kullanılmıştır. 1, 2, 3, 4 ve 5 saat (s) süreleri seçilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçları

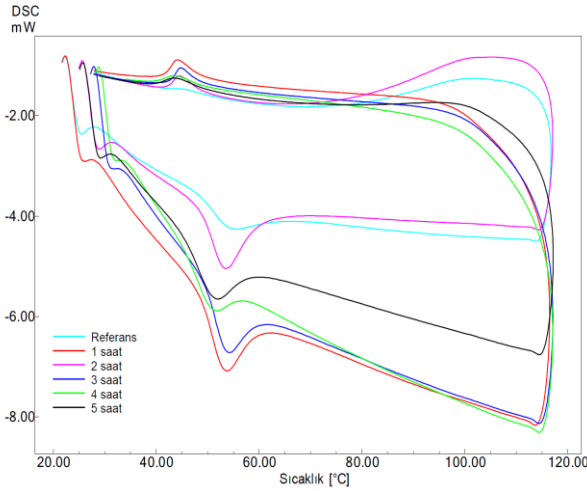
**Tablo 2.** Yaşlandırılmış numunelerin dönüşüm sıcaklıkları

	$A_s$ (°C)	$A_f$ (°C)	$A_{max}$ (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$M_s$ (°C)	$M_f$ (°C)	$V_{max}$ (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)
Referans	48.86	63.31	55.82	3.75	46.19	42.43	44.18	-0.91
200 °C 1 s	48.67	60.32	53.99	2.42	48.20	42.07	44.35	-3.86
200 °C 2 s	48.11	60.32	53.71	2.08	48.41	42.48	44.60	-5.62
200 °C 3 s	49.12	60.37	54.46	1.92	47.81	42.94	44.87	-3.77
200 °C 4 s	46.24	56.80	51.79	1.66	47.85	40.80	43.62	-2.30
200 °C 5 s	47.58	58.85	52.12	2.36	48.41	40.53	43.67	-3.63

karşılaştırmak için hiçbir ısı işlem uygulanmayan referans numunesi içinde analizler yapılmıştır. Yaşlanma işlemi için fırın kullanılarak, termal işlem sonrası numuneler oda sıcaklığında soğutulmuştur. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ölçümleri, karakteristik faz dönüşüm sıcaklıklarını ve termodinamik parametreleri belirlemek için kullanılmıştır. Analizler 20°C/dakika bir ısıtma-soğutma hızında gerçekleştirilmiştir. Termal analizlerden sonra malzemenin içindeki kristal yapıdaki değişimleri bulmak için X-ışını kırınımı (XRD) analizi yapılmıştır. Örneklerin XRD analizi, oda sıcaklığında CuK $\alpha$  radyasyonu kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin yüzey yapılarının belirlenmesi için, optik mikroskop incelemelerinde 10% HF-60% HNO<sub>3</sub>-30% CH<sub>3</sub>COOH dağlama çözeltisi kullanılarak numune hazırlığı tamamlanmış olup, numunelerin metalografik yapılar incelenmiş ve martensit oluşumlar gözlemlenmiştir.

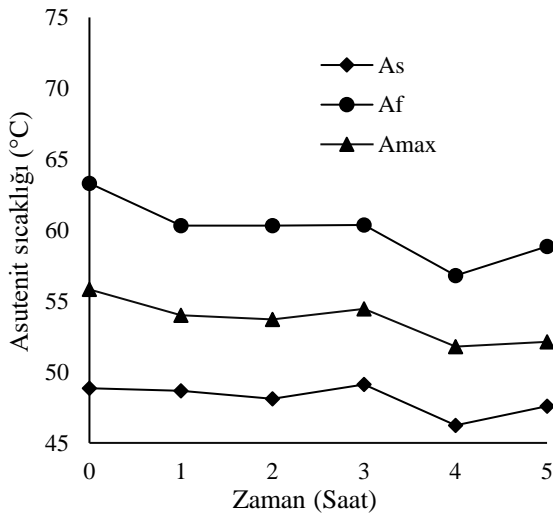
## 3. Sonuçlar

Şekil hafızalı metallerin davranışını belirlemede termal karakterizasyon çok önemli bir rol taşımaktadır. Genellikle, termal olarak aktive olan bu akıllı malzemelerin sergileyeceği kararlılık çok önem arz etmektedir. Bu nedenden dolayı ısı işlemler sonrası malzemenin göstereceği her türlü termal kararsızlık uygulama alanını kısıtlayıcı bir faktör olacaktır. Yapılan deneyler sonucunda DSC ölçümleri (Şekil 1) tamamlanarak elde edilen veriler Tablo 2.'de verilmiştir.

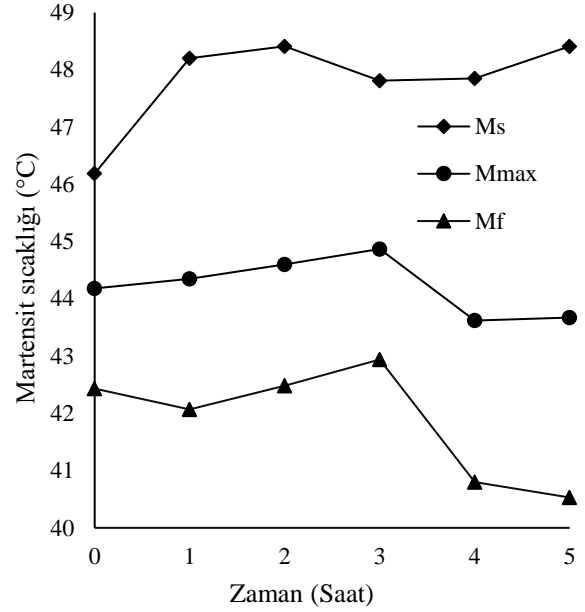


Şekil 1. Yaşlandırılmış numunelerin DSC grafikleri

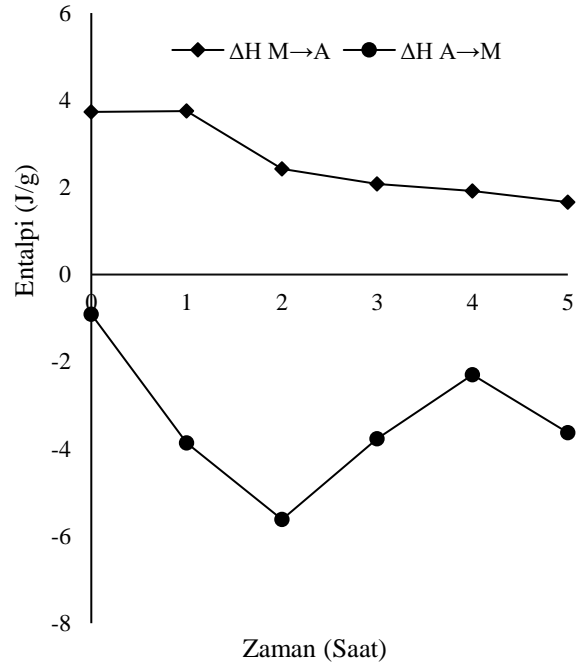
Şekil 2 ve Şekil 3’de austenit ve martensit sıcaklıklarının 200°C yaşlandırma zamanına göre değişim miktarları görülmektedir. Grafiklerdeki “0” ile belirtilen saat dilimi hiçbir ısıl işlem yapılmamış referans numunesini belirtmektedir. Referans numunesi 200 derece sonrası dönüşüm sıcaklıklarında yaklaşık %3-4 civarı bir düşüş yaptıktan sonra 1 saat ile 3 saat arasında kararlı bir yapı sergilemektedir. Fakat 4. saat itibari ile dönüşüm sıcaklıklarında yeniden %3-4 gibi bir oranda değişim söz konusudur. Bu değişim aynı zamanda Şekil 4’de entalpi grafiğinde de açıkça görülmektedir. Ana faz olan austenit fazdaki termal dönüşüm sıcaklık değişimleri ürün fazı olan martensit fazına göre daha düzenli olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 2. Austenit sıcaklıklarının yaşlandırma zamanına göre değişim sıcaklıkları

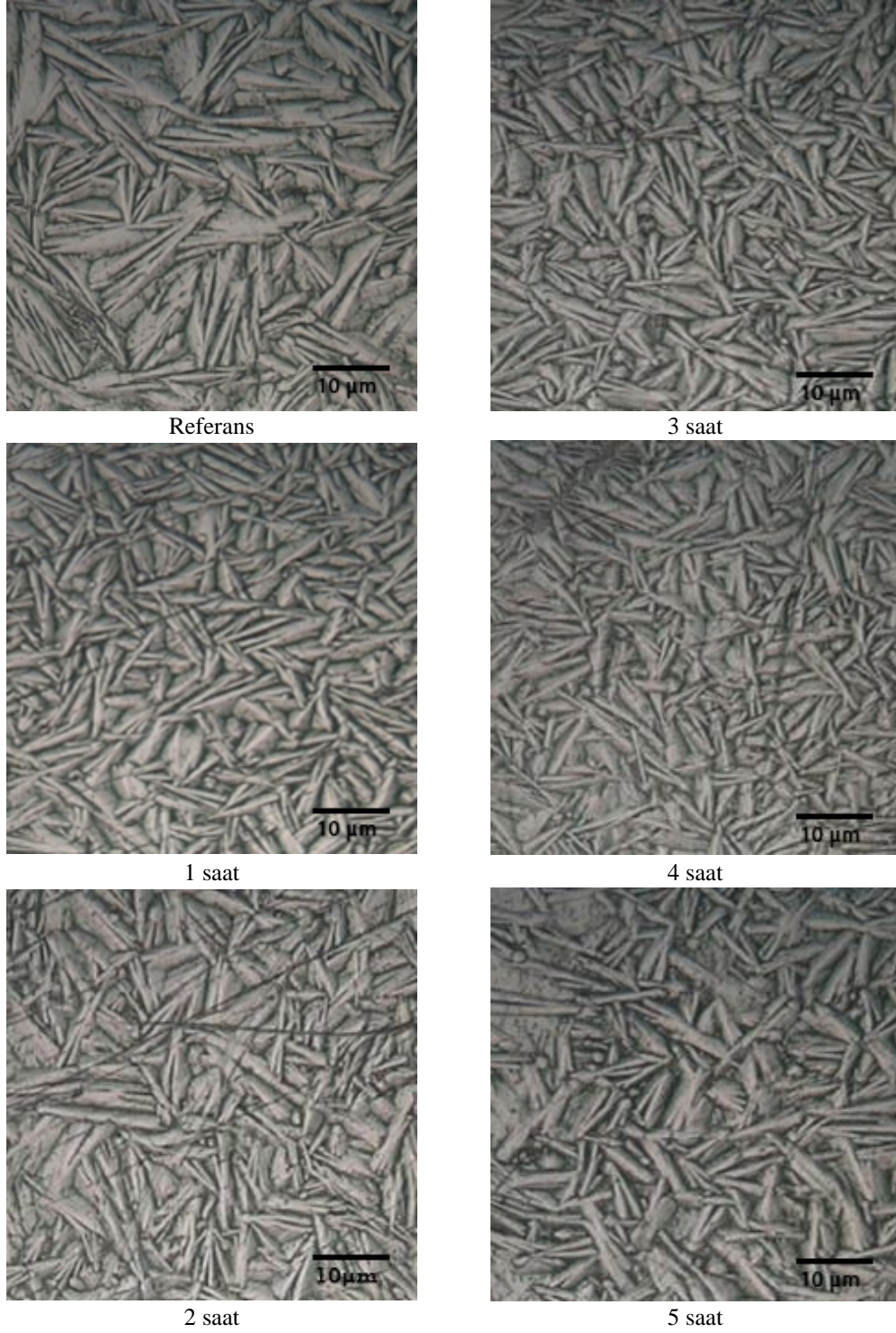


Şekil 3. Martensit sıcaklıklarının yaşlandırma zamanına göre değişim sıcaklıkları



Şekil 4. Entalpi değerinin yaşlandırma zamanına göre değişim miktarı

TiNi alaşımının oda sıcaklığında optik mikroskop ile görüntüleri alınmış elde edilen mikrograflar Şekil 5’de sunulmuştur.

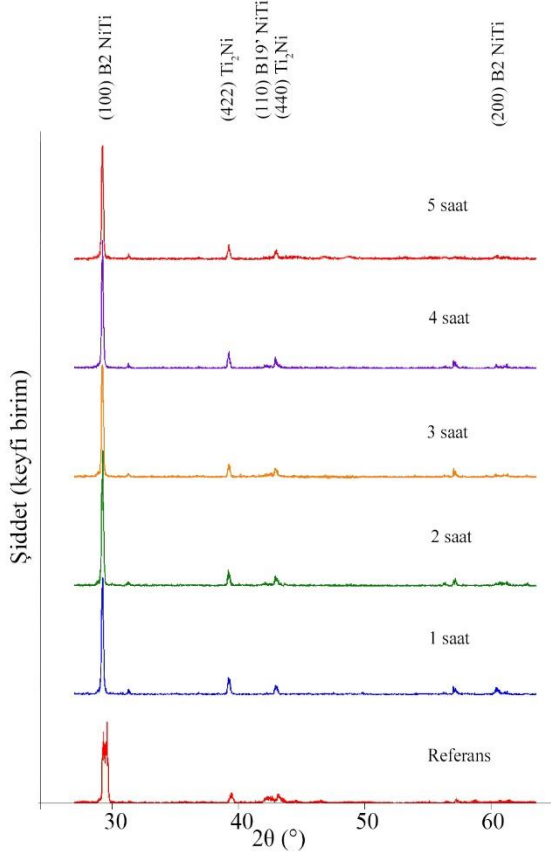


Şekil 5. Yaşlandırma zamanına bağlı olarak numunelerden elde edilen optik mikroskop görüntüleri

Şekil 5’de farklı 200 °C de farklı sürelerde yaşlandırma yapılmış numunelerden elde edilen optik mikrograflar mevcuttur. Elde edilen bu görüntülerden yapıların tam olarak martensit

fazda olduğu ve bu fazın en büyük işaretçisi olan martensitik plakaların var olduğu görülmektedir. Martensitik plakalar genel olarak farklı yönelimlere dağılım gösteren iğne tipi şekliyle

literatüre uygun olarak yer almıştır [20]. Optik mikroskop görüntülerinde yaşlandırma zamanının mikro yapı üzerinde pek etkili olmadığı görülmüş fakat 5 saat yaşlandırılmış olan numunenin plakalarının diğerlerine göre daha kaba olduğu saptanmıştır.



Şekil 6. Deney numunelerinin XRD difraktogramları

Farklı sürelerde yaşlandırılan numunelerinin XRD difraktogramları Şekil 6'da sunulmuştur. Malzemelerin yapısında B2, B19' ve Ti<sub>2</sub>Ni yapısının baskın olduğu görülmüştür. Yaşlandırma sürelerine bağlı olarak kristal kafes üzerindeki yapıların yansımaları olan pik değerleri üzerinde ciddi bir değişiklik olmadığı

## 5. Kaynaklar

1. Van Humbeeck, J. (2001). Shape memory alloys: a material and a technology. *Advanced engineering materials*. **3**: 837-850.
2. Ozkul, I., C.A. Canbay, F. Aladağ, and K. Aldaş (2017). The effect of the aging period on the martensitic transformation and kinetic characteristic of at% Cu 68.09 Al 26.1 Ni 1.54 Mn

gözlemlenmiştir. 5 saat yaşlandırma yapılan numunede is 58° civarındaki pik değerinin kaybolduğu gözlemlenmiştir.

## 4. Tartışma

Şekil hafızalı alaşımların kullanım alanında göstereceği kararlılık malzemenin kalitesini belirleyen en büyük unsurdur. Bu tanıma bağlı olarak oda sıcaklığının biraz üzerinde dönüşüm sıcaklığı sergileyen TiNi alaşımının 200 °C gibi yüksek bir değerde yaşlandırma ortamı yaratılarak farklı bekleme sürelerine göre deneyler yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda referans numunesi ile yaşlandırılmış numunelerin A↔M karakteristik dönüşüm sıcaklıkları karşılaştırıldığında bu dönüşüm sıcaklıklarının, 200°C sıcaklığında yaşlandırma süresine bağlı olarak %3-4 civarında bir düşüş sergilediği gözlemlenmiştir. Bu düşüş, referans numunesinin iç gerilimlerinden kaynakladığı görülmüş fakat bunun 1 saat ve sonrasındaki yaşlandırma süreleri söz konusu olduğunda düzene girdiği belirlenmiştir. Malzemenin iç yapı görüntülerinden numunelerin yapısal olarak etkilenmediği martensitik plakaların görünümlerinden anlaşılmıştır. 5 saatlik yaşlandırılmış numunenin görüntülerinde diğer mikrograflara göre plakaların nispeten büyüdüğü saptanmıştır. Numunelerin mikro yapılarını destekler nitelikteki XRD difraktogramlarında da 200 derecede yaşlandırmanın önemli derecede malzeme yapısında bir değişikliğe neden olmadığı anlaşılmıştır. Bu yapılan analizler sonucunda son ürün olarak kullanılabilen bu TiNi alaşım türünün yüksek sıcaklıklarda kullanım alanına bağlı olarak göstermiş olduğu kararlılık toleransları belirlenmiştir.

4.27 shape memory alloy. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. **58**: 130-135.

3. Eşkil, M., K. Aldaş, and İ. Özkul (2015). Prediction of thermodynamic equilibrium temperature of Cu-based shape-memory smart materials. *Metallurgical and Materials Transactions A*. **46**: 134-142.
4. Canbay, C.A. and T. Polat (2017). Thermal and structural alternations in CuAlMnNi shape memory alloy by the effect of different pressure

- applications. *Physica B: Condensed Matter*. **521**: 331-338.
5. Canbay, C.A., S. Gudeloglu, and Z.K. Genc (2015). Investigation of the enthalpy/entropy variation and structure of Cu–Al–Mn–Fe shape memory alloys. *International Journal of Thermophysics*. **36**: 783-794.
  6. Canbay, C.A., S. Ozgen, and Z.K. Genc (2014). Thermal and microstructural investigation of Cu–Al–Mn–Mg shape memory alloys. *Applied Physics A*. **117**: 767-771.
  7. Gall, K. and H. Maier (2002). Cyclic deformation mechanisms in precipitated NiTi shape memory alloys. *Acta Materialia*. **50**: 4643-4657.
  8. Canbay, C.A., A. Tekatas, and I. Ozkul (2017). Fabrication Of Cu-Al-Ni shape memory thin film by thermal evopration. *Turkish Journal of Engineering*. **1**: 27.
  9. Frick, C.P., A.M. Ortega, J. Tyber, A.E.M. Maksound, H.J. Maier, Y. Liu, and K. Gall (2005). Thermal processing of polycrystalline NiTi shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*. **405**: 34-49.
  10. Santoro, M., O.F. Nicolay, and T.J. Cangialosi (2001). Pseudoelasticity and thermoelasticity of nickel-titanium alloys: a clinically oriented review. Part I: Temperature transitional ranges. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. **119**: 587-593.
  11. Chu, C., C. Chung, and P. Lin (2005). DSC study of the effect of aging temperature on the reverse martensitic transformation in porous Ni-rich NiTi shape memory alloy fabricated by combustion synthesis. *Materials letters*. **59**: 404-407.
  12. Özkul, I. (2018). The effect of aging time on at.% Ti 59.27 Ni 40.73 shape memory alloy. *Physica B: Condensed Matter*.
  13. Carroll, M., C. Somsen, and G. Eggeler (2004). Multiple-step martensitic transformations in Ni-rich NiTi shape memory alloys. *Scripta Materialia*. **50**: 187-192.
  14. Bojda, O., G. Eggeler, and A. Dlouhý (2005). Precipitation of Ni<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>-variants in a polycrystalline Ni-rich NiTi shape memory alloy. *Scripta materialia*. **53**: 99-104.
  15. Chang, C.-Y., D. Vokoun, and C.-T. Hu (2001). Two-way shape memory effect of NiTi alloy induced by constraint aging treatment at room temperature. *Metallurgical and materials Transactions A*. **32**: 1629-1634.
  16. Canbay, C.A. and I. Ozkul (2018). Aging effects on transformation temperatures and enthalpies for TiNi alloy. *Turkish Journal of Engineering*. **2**: 7.
  17. Elahinia, M.H., M. Hashemi, M. Tabesh, and S.B. Bhaduri (2012). Manufacturing and processing of NiTi implants: a review. *Progress in materials science*. **57**: 911-946.
  18. Pereira, E., I. Peixoto, A. Viana, I. Oliveira, B. Gonzalez, V. Buono, and M. Bahia (2012). Physical and mechanical properties of a thermomechanically treated NiTi wire used in the manufacture of rotary endodontic instruments. *International endodontic journal*. **45**: 469-474.
  19. Khalil-Allafi, J., A. Dlouhy, and G. Eggeler (2002). Ni<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>-precipitation during aging of NiTi shape memory alloys and its influence on martensitic phase transformations. *Acta Materialia*. **50**: 4255-4274.
  20. Ataei, M., A. Zarei-Hanzaki, and A. Shamsolhodaie (2017). Shape memory response and mechanical properties of warm deformed NiTi intermetallic alloy. *Materials Science and Engineering: A*. **680**: 291-296.

## Ayrık Dalgacık Dönüşümünün FPGA Tabanlı Donanımsal Gerçeklenmesi

Resul ÇÖTELİ<sup>1</sup>, Serkan METİN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği, Elazığ, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Fırat Üniversitesi, Karakoçan Meslek Yüksekokulu, Elazığ, TÜRKİYE  
rcoteli@gmail.com

(Geliş/Received: 20.03.2018; Kabul/Accepted: 07.08.2018)

### Özet

Ayrık Dalgacık dönüşümü (ADD), gürültülü sinyal içeren uygulamalarda gürültü giderimi için kullanılan bir ön işlem adıdır. ADD'nün Alan Programlanabilir Kapı Dizileri (FPGA) kullanılarak gerçekleştirilmesinde, geleneksel HDL tabanlı tasarımın da bilinmesi gerekir. Bunun yanında, Matlab/Simulink tabanlı Xilinx System Generator (XSG), geleneksel HDL tabanlı tasarım bilinmesede dahi FPGA'nın programlanmasına olanak tanır. Bu makalede, Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) tabanlı bir filtre Xilinx System Generator (XSG) kullanılarak Alan Programlanabilir Kapı Dizileri (FPGA)'de gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ADD, radar sinyallerine eklenen kaotik gürültüyü filtreleme amacı ile kullanılmıştır. İlk olarak, gürültülü radar sinyali ADD yöntemi ile istenilen seviyeye ayrıştırılır. Bu ayrıştırma işleminden elde edilen katsayılar eşikleme yöntemi uygulanarak gürültülü katsayılar yok edilir. Son olarak, tekrar oluşturma işlemi ile gerçek sinyal elde edilir. Donanımsal gerçekleştirilen ADD'nün performansı, gürültüsüz radar sinyali ve gürültüden arındırılmış radar sinyali arasındaki ortalama karesel hatanın karekökü ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan sinyalin gürültüye oranının çok düşük kaldığı durumlarda başarımın çok iyi olmadığı, 20 dB değerinden sonra başarımın oldukça iyi olduğu görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Radar Sinyali, Kaotik Gürültü, ADD, FPGA.

## Hardware Implementation of FPGA-Based Discrete Wavelet Transform

### Abstract

Discrete Wavelet Transform (DWT) is a pre-processing step used for noise reduction in applications with noisy signals. When ADD is implemented using Field Programmable Gate Arrays (FPGAs), the traditional HDL-based design must be known. Matlab / Simulink-based Xilinx System Generator (XSG) allows the FPGA to be programmed without knowing the traditional HDL-based design. In this paper, DWT was implemented in the Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) using the Xilinx System Generator (XSG). The ADD is used for chaotic noise filtering added to radar signals. First, the noisy radar signal is separated into the desired level by using ADD. The coefficient-based thresholding method obtained from this decomposition is applied to eliminate the noisy coefficients. Finally, the real signal is obtained by the reprocessing process. The performance of the hardware ADD is evaluated by the square root of the mean squared error between the real radar signal and the noise cancelled radar signal. If the ratio of signal to noise is too low, the performance is not very good, and after 20 dB, the performance is quite good.

**Keywords:** Radar Signal, Chaotic Noise, DWT, FPGA.

### 1. Giriş

Radar ve radar uygulamaları haberleşme sistemlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Haberleşme sinyallerine ve diğer önemli sinyallere (biyomedikal vb.) çevresel ya da bilinçli (insan kaynaklı) nedenlerden dolayı gürültü bulaşabilir. Bununla birlikte verilerin elde edilme sürecinde de (ölçümler ya da gözlemler)

gürültü orjinal sinyale karışabilir. Bu problem, gürültünün bilinen bir sinyale eklenmesi, parametreleri tespit edilememiş bir sinyale bindirilmesi veya rastgele bir sinyale bulaşması olmak üzere üç farklı şekilde meydana gelir.

Haberleşme sinyalleri (radar, sonar vb.) yoğun bir şekilde elektromanyetik bozucu gürültüler (Elektronik savaş, bilgi tabanlı harp) tarafından bozulabilir. Bu durumlarda orjinal

sinyallerdeki gürültüyü giderme işlemi oldukça önem kazanmaktadır [2].

Gürültüyü giderme ile ilgili literatürde oldukça fazla sayıda çalışma yer almaktadır. Bu çalışmaların büyük bir kısmında geleneksel yöntemler, Fourier Dönüşümü ve Güç Spektral Yoğunluğu gibi yöntemler kullanılmaktadır. Sinyalin çok yoğun gürültüye maruz kaldığı durumlarda bu yöntemler tatmin edici sonuçlar veremeyebilirler [3-5]. Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) tabanlı yöntemler son zamanlarda gürültü giderme algoritmalarında oldukça sık kullanılmaktadır. Ref. [6]'da radar sinyallerinde gürültüyü gidermek için ADD önerilmiştir. Bahsedilen çalışmada iki yöntem sunulmuştur. Birinci yöntemde, ADD eşlenik filtre olarak kullanılmıştır. İkinci yöntemde ise farklı ölçekler için dalgacık katsayıları ile ilgili yöntemdir. Ref. [7]'de zayıf sinyal tespiti ve sinyal lokalizasyonu için dalgacık paket ve yüksek dereceli istatistik yöntemini önermiştir. Ref. [8]'de Gauss tipi olmayan gürültülerde radar sinyallerini belirleyebilen radyal tabanlı sinir ağı kullanan bir yöntem önermişlerdir.

Bu çalışmada, kaotik gürültü ile bozulmuş radar sinyallerinden gürültünün giderilmesi için kullanılan ADD donanımsal olarak Matlab/Simulink Xilinx System Generator (XSG) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, ilk olarak çeşitli seviyelerde kaotik sinyaller elde edilmiştir. Elde edilen kaotik sinyaller radar sinyaline eklenmiştir. Sinyaldeki gürültülü bileşenler ADD yöntemi ile tespit edilmiş ve gürültüsüz gerçek sinyal elde edilmeye çalışılmıştır. Matlab/Simulink XSG kullanılarak gerçekleştirilen ADD'nün donanımsal benzetimi yapılmış ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.

## 2. Ayrık Dalgacık Dönüşümü ve Gürültü Giderim Yöntemi

Gürültüye maruz kalan sinyaller için Dalgacık dönüşümü yöntemi ile birlikte gürültü giderim algoritması birlikte kullanılabilir. DD yönteminin; farklı frekans çözünürlükleri, tüm spektrumun hesaplanmasına ihtiyaç duymaması, düşük frekans olan bölgelerde hızlı olabilmesi gibi üstünlükleri geleneksel yöntemlere göre daha iyidir [9]. Ayrıca bu yöntemin diğer bir üstünlüğü olarak, düşük frekansın önemli olduğu yerler için büyük zaman aralıklarının, yüksek frekansın

önemli olduğu yerler için de küçük zaman aralıklarının kullanılabilmesi sayılabilir [10-11].

Gürültü ile bozulmuş herhangi bir sinyalin genel eşitliği Denklem 1'de verilmiştir.

$$y[n] = x[n] + d[n] \quad (1)$$

Bu denklemde  $x[n]$ , gürültüsüz radar sinyalini,  $d[n]$  radar sinyaline bulaşan kaotik gürültüyü,  $y[n]$  ise kaotik gürültülü radar sinyalini temsil etmektedir. Bu çalışmada, radar sinyallerine bozucu giriş olarak Lorenz denklemlerinden elde edilen sinyal eklenmiştir (Denklem 2). Lorenz Denklemi kaotik sinyal üretmek için sıkça kullanılan ve akışkan davranışları için (iki boyutlu) önerilen sistemdir [12].

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -ax + ay \\ \frac{dy}{dt} &= cx - y + xz \\ \frac{dz}{dt} &= -bz + xy \end{aligned} \quad (2)$$

Denklem 2'de;  $a$ ,  $b$  ve  $c$  katsayıları,  $x$ ,  $y$  ve  $z$  dinamik değişkenleri göstermektedir [12]. Geleneksel gürültü giderim algoritmalarında, orijinal sinyalin yüksek frekanslı bileşenleri gürültü bileşenleri kabul edilerek yok edilir. ADD tabanlı gürültü giderme algoritmalarında ise orijinal sinyalin yüksek frekanslı bileşenleri gürültü gibi değerlendirilmemektedir [13-14]. ADD'ne ait eşitlik Denklem 3'de verilmiştir.

$$ADD(m, n) = 2^{-m/2} \int f(t) \cdot \psi(2^{-m}t - n) dt \quad (3)$$

Denklem 3'te,  $f(t)$  dönüşüme tabi tutulacak sinyali,  $\psi$  filtreyi,  $m$  dönüşümdeki ölçeklemeyi,  $n$  ise öteleme oranını gösterir.

Kaotik gürültülü radar sinyallerini gürültüden temizlemek için ADD ile sinyalin dalgacık katsayıları bulunur [13, 15-16]. Dalgacık katsayılarını elde edebilmek için kaotik gürültülü radar sinyali seviyelere bölünür. Daha sonra bu dalgacık katsayılarının varyansı ( $\sigma^2$ ) Denklem 4 kullanılarak bulunur.

$$\sigma^2 = \frac{\text{med}|D_{j,k}|}{0.6745} \quad (4)$$



Denklem 4’de,  $med$  katsayıların ortanca değerini,  $D_{j,k}$  ise dalgacık katsayılarını belirtir. Varyans değeri hesaplandıktan sonra eşik değeri Denklem 5 yardımı ile bulunabilir.

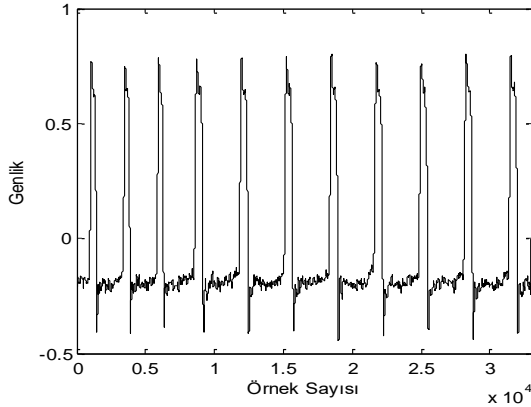
$$E = \sigma^2 \sqrt{2 \cdot \log(n)} \quad (5)$$

Denklem 5’te gösterilen  $E$  varyans yardımıyla hesaplanan eşik değerini,  $n$  değeri ise örnek sayısını gösterir.

Eşik değeri kaotik gürültülü radar sinyalinin varyansına göre hesaplandıktan sonra sinyale ait gürültülü katsayılar tespit edilir. Gürültülü olarak değerlendirilen ve asıl sinyale ait olmayan katsayılar yumuşak ya da sert eşiklemeye tabi tutularak yok edilir. Eşikleme işleminin sonucunda kalan katsayılar (yok edilmeyen) yani asıl sinyale ait olduğu düşünülen katsayılar yeniden birleştirilerek radar sinyali elde edilir.

### 3. Kaotik Gürültülü Radar Sinyalini Gürültüden Arındırmak için FPGA Mimarisinin Kullanılması

Bu çalışmada, haberleşme sinyalleri içerisinde önemli bir yere sahip olan radar sinyalleri kullanılmıştır [17]. Ref. [17]’den elde edilen radar sinyaline ait grafik Şekil 1’de verilmiştir. Şekil 1’de verilen radar sinyali 33000 örnekten oluşmaktadır.



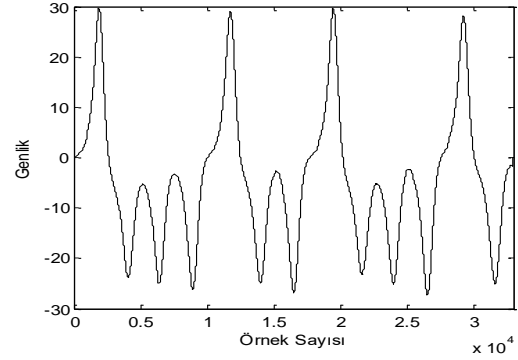
Şekil 1. Radar sinyali

Şekil 1’de gösterilen radar sinyali gürültü içermeyen bir sinyaldir. Önemli bir haberleşme sinyali olan radar sinyali çevresel etkiler ya da insan yapımı gürültülerden kolaylıkla

etkilenebilmektedir. Bu çalışmada Lorenz eşitliğinden elde edilen kaotik sinyal çeşitli oranlarda radar sinyaline gürültü olarak eklenmiştir.

Şekil 1’de verilen radar sinyaline, Sinyalin Gürültüye Oranı (SGO) -5.0035 Db olan kaotik gürültü eklenirse Şekil 2’de verildiği gibi gürültülü radar sinyali elde edilmiş olur.

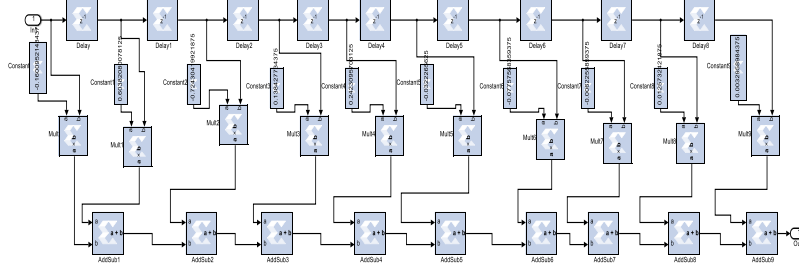
Şekil 3’te ise 10.0063 dB SGO’na sahip kaotik gürültülü radar sinyali verilmiştir. FPGA donanımı, DD ve gürültü giderimi için tasarlanmıştır. DD’de ayrıştırma işlemi 3 seviyede ve Daubechies 3 (db3) dalgacık türü kullanılarak yapılmıştır. Bu gerçeklemeye ait işlemleri gösteren bloklar Şekil 4’te verilmiştir. Şekil 4’de verilen bloklarda X ile gösterilen kaotik gürültülü radar sinyalini göstermektedir. Burada ilk olarak gürültülü sinyal seçilen seviyeye ayrıştırılmaktadır.



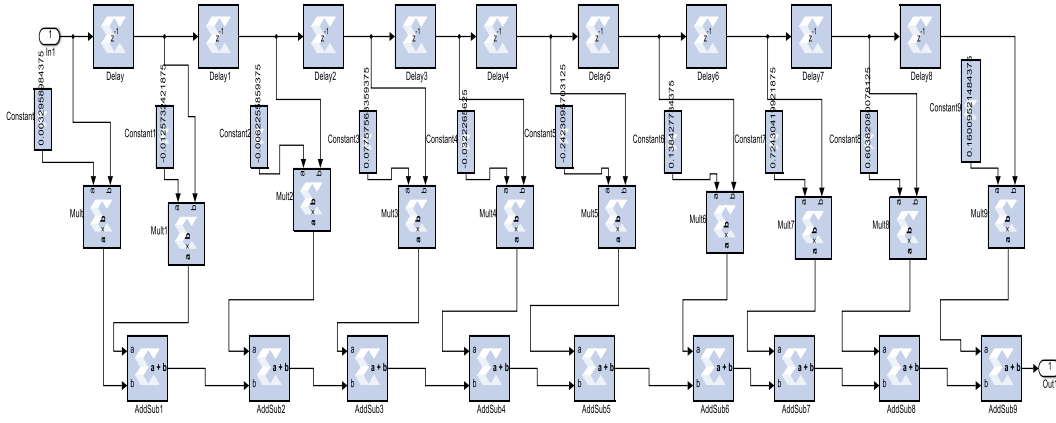
Şekil 2. -5.0035dB oranında kaotik gürültülü radar sinyali

Bu işlemin sonucunda yaklaşık ve detay katsayıları elde edilir. Daha sonra Bölüm 2’de verilen eşikleme işlemine tabi tutularak gürültülü katsayılar tespit edilir. Sinyale ait gürültülü katsayılar yok edilip gürültülü bileşenler temizlenir. Bu işlemin ardından elde edilen katsayılar tekrar birleştirilerek gürültüsüz radar sinyali elde edilir.



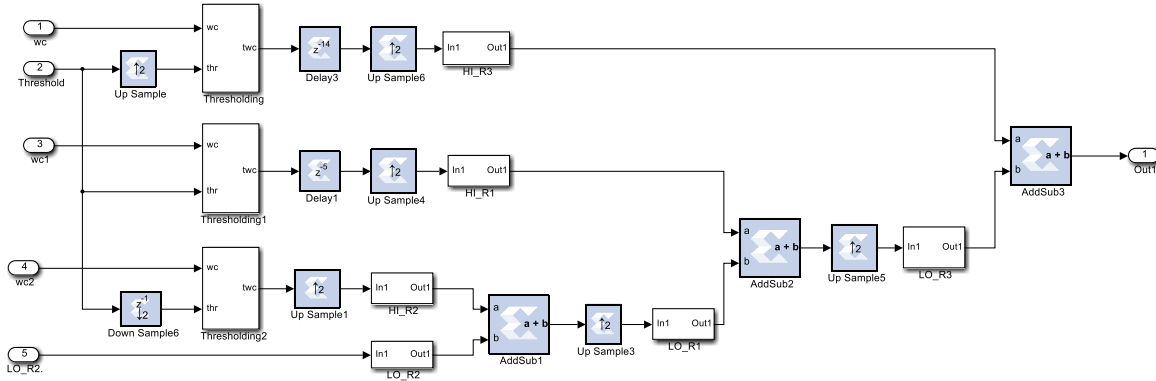


a) YG filtre



b) AG filtre

Şekil 5. FPGA tabanlı ADD



Şekil 6. FPGA tabanlı tekrar birleştirme işlemi

Şekil 6’da tekrar birleştirme işlemine ait Matlab/Simulink XSG modeli verilmiştir. Donanımsal olarak oluşturulan ADD’nin ne kadar kaynak kullandığı Resource Estimator ile elde edilir. Bu bloktan elde edilen kaynak kullanımı bilgisi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Donanımsal gerçekleştirilen FPGA tabanlı ADD’nin kaynak kullanımı

Kaynak	Miktar
Slices	39706
FFs	54583
LUTs	57961
IOBs	201
Mults/DSP48s	599

Tablo 1’de kaotik gürültünün farklı SGO’larda eklendikten sonra başarımları gösterilmiştir. Tablo 1’de bir haberleşme sinyali olan radar sinyaline çeşitli SGO oranlarında kaotik gürültüler eklenmiştir. Kaotik gürültülü radar sinyalleri Şekil 2’de verilen bloklarda önce seviyelerine ayrıştırılmıştır. Daha sonra gürültülü dalgacık katsayıları tespit edilerek yok edilmiştir. Bu işlemden sonra kalan katsayılar tekrar birleştirilip gürültüsüz radar sinyali elde edilmeye çalışılmıştır. Bu işlemlerin ne kadar başarılı olup olmadığını tespit edebilmek için OKHK başarımlarını kullanılmıştır.

Tablo 2’de elde edilen sonuçlardan SGO’nun çok düşük kaldığı durumlarda başarımın çok iyi olmadığı görülebilmektedir. Bu donanımsal gerçeklemede özellikle 20 dB değerinden sonra başarımların oldukça düzeldiği görülebilmektedir.

**Tablo 2.** Radar sinyaline farklı oranlarda kaotik gürültüler eklendikten sonra OKHK değerleri

SGO (dB)	OKHK
-5.0035	1.8785
-4.0061	1.8537
-3.0028	1.8284
-2.0074	1.8025
-1.0076	1.7756
0.0011	1.7476
1.0024	1.7186
2.0091	1.6882
3.0006	1.6569
4.0022	1.6218
5.0053	1.5789
6.0032	1.5313
7.0016	1.4824
8.0023	1.4309
9.0003	1.3746
10.0063	1.3112
11.0012	1.2398
12.0065	1.1468
15.0651	0.8277
20.0000	0.5129
25.0207	0.3509
30.0338	0.2631

#### 4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, kaotik gürültü ile bozulmuş olan radar sinyallerinde gürültü giderimi için kullanılacak ADD donanımsal olarak FPGA’da gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan sinyalin gürültüye göre çok zayıf kaldığı durumlarda

gürültü giderim başarımının çok iyi olmadığı tespit edilmiştir. Dalgacık dönüşüm seviye sayısının artırılması ve farklı dalgacık ailesi türlerinin kullanılması ADD’nin gürültü giderim başarımını artırabilir. Bunun yanında, seviye sayısının artırılması FPGA’da kullanılacak kaynak sayısının artmasına neden olacaktır. Bununla birlikte sinyale bozucu giriş olarak uygulanan gürültü tipine ve istatistiksel özelliklerine göre hem dalgacık türü hem de seviyesi belirlenmesi durumunda başarımlar artabilir.

#### 5. Kaynaklar

1. Ralph, D.H. (2002). Detection theory applications and digital signal processing. CRC Press.
2. Chen, W., Meng, C., Wang, C., and Zhang, Z. (2009). Summary on weak signal detection methods based on chaos theory. The Ninth International Conference on Electronic Measurement and Instruments. IEEE.
3. Wang, G., etc. (1997). Application of chaos oscillator in detection of signal under the background of strong noise. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, **18(2)**: 209-212.
4. Chongyu, W., Weijuan, Z. (2010). Weak signal de-noising method based on accumulation in frequency domain and wavelet transform. In Information Processing (ISIP), 2010 Third International Symposium on (pp. 130-133).
5. Li, C. (2005). Study of weak signal detection based on second FFT and chaotic oscillator. *Nature and Science*, **3(2)**, 59-64.
6. Ehara, N., Sasase, I., Mori, S. (1994). Weak radar signal detection based on wavelet transform. *Electronics and Communications in Japan (Part III: Fundamental Electronic Science)*, **77(8)**, 105-114.
7. Alyt, O.A., Omar, A.S., and Elsherbeni, A.Z. (2006). Detection and localization of RF radar pulses in noise environments using wavelet packet transform and higher order statistics. *Progress In Electromagnetics Research*, **58**, 301-317.

8. Khairnar, D.G., Merchant, S.N., and Desai, U.B. (2008). Radar signal detection in non-gaussian noise using RBF neural network. *JCP*, **3(1)**, 32-39.
9. Uyar, M., Yıldırım, S., Gençoğlu, M.T. (2013). Güç kalitesi problemlerinin analizi için işaret işleme yöntemlerinin karşılaştırılması. *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, **25 (1)**, 21-31.
10. Goswami, J.C., and Chan, A.K. (2011). Fundamentals of wavelets: theory, algorithms, and applications (Vol. 233). John Wiley & Sons.
11. Vetterli, M., Herley, C. (1992). Wavelets and filter banks: theory and design. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **40**, pp. 1.
12. Yardım, F.E., Afacan, E. (2010). Lorenz-tabanlı diferansiyel kaos kaydırmalı anahtarlama (DCSK) modeli kullanılarak kaotik bir haberleşme sisteminin simülasyonu. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **25**, 101-110.
13. Üstündağ, M., Gökbulut, M., Şengür, A., Ata, F. (2012). Denoising of weak ECG signals by using wavelet analysis and fuzzy thresholding. *Network Modelling Analysis in Health Informatics and Bioinformatics*, **1**, pp.135-140.
14. Fletcher, A.K. (2002). Denoising via recursive wavelet thresholding. Master of Science in Electrical Engineering in the Graduate Division of the University of California, Berkeley.
15. Zhang, Q., Rossel, R.A., Choi, P. (2006). Denoising of gamma-ray signals by interval-dependent thresholds of wavelet analysis. *Measurement Science and Technology*, **17(1)**, pp.731-735.
16. Üstündağ, M. (2013). ECG sinyallerinde gürültü gidermek için dalgacık dönüşümünün FPGA tabanlı donanımsal gerçekleştirilmesi. *Fırat Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **25(2)**, 63-68.
17. Avcı, E. (2005). Akıllı radar ile hedef tanıma sistemi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enst.



## Eylem Öğrenmenin Okul Yöneticileri ve Yönetici Adaylarının Karar Vermelerine Etkisinin Veri Madenciliği Teknikleri ile İncelenmesi

<sup>1</sup>Dönüş Şengür, <sup>2</sup>Muhammed Turhan, <sup>3</sup>Songül Karabatak  
1Şht.Pyd. Bnb. Zafer KILIÇ Anadolu İmam Hatip Lisesi, Elazığ/Türkiye  
2 Fırat Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Elazığ/Türkiye  
3 Fırat Üniversitesi, Enformatik Bölümü, Elazığ/Türkiye  
e-mail: kdksengur@gmail.com

(Geliş/Received:09.07.2018; Kabul/Accepted:27.08.2018)

### Özet

Etkili okul yöneticilerinde olması gereken özelliklerden biri de doğru karar verebilmedir. Yöneticilerin verdiği doğru kararlar, örgütün ayakta kalabilmesi için oldukça önemlidir. Doğru ve rasyonel karar verebilme ise okul yöneticisinin değerleri, bilgi ve becerileri ile yakından ilişkilidir ve okul yöneticilerinin doğru karar verebilmesi için bu konuda iyi yetişmiş olmaları gereklidir. Eylem öğrenme, karmaşık ve gerçek sorunlar üzerinde çalışmak amacıyla bir araya gelmiş bir grup gönüllü meslektaşın sürekli öğrendikleri ve öğrendiklerini yansıttıkları bir süreçtir. Bu çalışmada, eylem öğrenme sürecinin okul yöneticileri ile yönetici adaylarının karar vermelerinde herhangi bir etkisinin olup olmadığı veri madenciliği teknikleri ile incelenmiştir. Bu bağlamda eğitimci veri madenciliği yöntemlerinden karar ağaçları, diskriminant analizi, destek vektör makineleri (DVM), k-en yakın komşu (k-EYK) ve birleştirilmiş öğrenciler yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada verilerin toplanması için Melbourne Karar Verme Ölçeği I-II (MKVÖ) kullanılmıştır. 38 katılımcı ile gerçekleştirilen eylem öğrenme süreci öncesinde ve sonrasında testler katılımcılara uygulanarak veriler toplanmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmada, eylem öğrenme sürecine katılan okul yöneticisi ve adaylarının karar vermelerindeki anlamlı değişikliklerin veri madenciliği teknikleri ile yüksek doğrulukla belirlendiği görülmüştür. Ayrıca, DVM tekniklerinin, karar ağaçları, birleştirilmiş sınıflandırıcılar ve k-EYK yöntemlerine oranla daha başarılı sonuçlar ürettiği görülmüştür.

**Anahtar Kelime:** Okul yöneticisi yetiştirme, Eylem öğrenme, Karar verme, Veri madenciliği teknikleri, Sınıflandırma.

## Data Mining Techniques Based Analysis of the Impact of Action Learning on Decision-Making Styles of School Administrators and Administrator Candidates

### Abstract

One of the qualities, that effective school administrators should have, is making right decisions. The right decisions made by the organizational management are very important for the organization to survive. Right and rational decision making is closely related to the values, knowledge and skills of the school administrator and school administrators need to be well trained in this area so they can make the right decisions. Action learning is a process in which a group of volunteer colleagues who come together to work on complex and real problems reflect on what they are constantly learning. In this study, data mining techniques were used to examine whether action learning had any influence on school administrators and candidates' decision making. In this context, some of the data mining techniques such as, decision trees, discriminant analysis, support vector machines (SVM), k-nearest neighbors (k-NN) and ensemble learner methods are used. In order to collect data set, an experimental organization was constructed where 38 participants were applied a pre-test and a post-test of Melbourne Decision Making Questionnaire I-II (MDMQ). In the experimental study, it is seen that data mining techniques are quite successful in determining of the significant changes in decision making of school administrators and candidates who attended the action learning process. In addition, SVM techniques have shown better performance than decision trees, ensemble classifiers, and k-NN methods.

**Keywords:** School administrator training, action learning, decision making, data mining methods, classification.

## 1. Giriş

Son yıllarda örgütsel ve yönetsel anlayıştaki değişim, eğitim sistemlerinde de birtakım değişimleri zorunlu hale getirmiş ve bu durum okul yöneticilerinden beklenen davranışları da etkilemiştir. Okul yöneticilerinin okullarını yönetebilmeleri için sahip olmaları gereken bilgi, beceri ve üstlenilen rollerin de gitgide değişiklik göstermesine neden olmuştur. Okul yöneticileri 1940’larda yalnızca “yönetici ve denetçi” olarak tanımlanırken zamanla “problem çözen, vizyoner, değişim ajanı, dönüşümcü lider, kolaylaştırıcı” gibi çok daha fazla beceri ve yeterlik gerektiren sıfatlarla tanımlanmaya başlamıştır [1-4].

Okul yöneticilerinin zamanla değişen rolleri incelendiğinde okulu yönetici veya denetçi sıfatıyla yönetecek bir kimsenin çağın gerektirdiklerine cevap verebilmesi, dolayısıyla etkili bir okul yöneticisi olabilmesi pek mümkün görünmemektedir. Okul yöneticilerinin 21. yüzyılın gerektirdiği karmaşık yapıdaki ihtiyaç ve beklentileri karşılayarak etkili birer okul yöneticisi olabilmeleri için uluslararası düzeyde birtakım beceri ve yeterliklere sahip olması önemli görülmektedir [5, 6]. Bu ihtiyaçları karşılayabilecek eğitim programlarının içeriğinin de yöneticilerin mesleki yaşamlarında karşılaşılabilecekleri sorunlarla başa çıkabilmelerini sağlayacak türde hazırlanmaları gerekmektedir [7, 8]. Birçok okul yöneticisi geliştirme programında, okul yöneticilerinin bilgi, beceri ve kapasitelerine katkıda bulunan, yetişkin öğrenmesine dayalı olarak daha dinamik öğrenme deneyimlerine imkân tanıyan köklü ve güçlü pedagojik uygulamaların kullanımının üstünde durulmaktadır [9, 10]. Türkiye için de bu tür uygulamalara duyulan ihtiyaç birçok araştırmada [11-17] dile getirilmiştir. Eylem öğrenme bu programlarda tercih edilen metotlardan biridir [18]. Çünkü eylem öğrenme, liderlik becerilerinin geliştirilmesinde oldukça etkili ve güçlü bir öğrenme metodu olarak belirtilmektedir [19-26].

Eylem öğrenme, gerçek zamanlı bir sosyal öğrenme sürecidir [26]. Bu sürecin “babası” kabul edilen Revans [27-29], eylem öğrenmeyi bir cümle ile tanımlamaktan kaçınmış ve bu yaklaşımın tek bir biçiminin olmadığını, tek bir formül ya da bir teknik olarak görülmemesi

gerektiğini dile getirmiştir. [30]’a göre eylem öğrenme; bireyin, ekibin, örgütün ve hatta bütün sistemin değişmesi için öğrenme ve problem çözme becerisi kazandırabilen bir yaklaşımdır. Ayrıca eylem öğrenme, karmaşık ve gerçek sorunlar üzerinde çalışmak amacıyla bir araya gelmiş bir grup gönüllü meslektaşın sürekli öğrendikleri ve öğrendiklerini yansıttıkları bir süreç olarak da tanımlanmaktadır [31]. Bu tanımlamalardan yola çıkarak eylem öğrenmeyi, bir grup insanın bir araya gelerek bir sorun hakkındaki deneyim ve fikirlerini paylaştıkları ve bireyi soruna karşı çözüm üretip hayata geçirmesine teşvik eden bir süreç olarak tanımlamak mümkündür.

Etkili okul yöneticilerinde olması gereken özelliklerden biri de doğru karar verebilmedir. Örgüt yönetiminin verdiği doğru kararlar, örgütün ayakta kalabilmesi için oldukça önemlidir. Doğru ve rasyonel karar verebilme ise okul yöneticisinin değerleri, bilgi ve becerileri ile yakından ilişkilidir ve okul yöneticilerinin doğru kararlar verebilmesi için bu konuda iyi yetişmiş olmaları gereklidir [32]. Bu nedenle okul yöneticisi yetiştirme programları hazırlanırken karar verme becerilerine olumlu katkı sağlayabilecek içeriklerin dahil edilmesi gerektiği söylenebilir.

Bu çalışma ile okul yöneticisi yetiştirme programlarında da sıklıkla kullanılan eylem öğrenmenin yönetici ve yönetici adaylarının karar verme becerilerine etkisinin olup olmadığı belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen programın etkililiğinin belirlenmesi için veri madenciliği teknikleri kullanılmıştır. Karar ağaçları, diskriminant analizi, destek vektör makineleri (DVM), k-en yakın komşu (k-EYK) yöntemi ve birleştirilmiş öğrenciler gibi iyi bilinen veri madenciliği yöntemleri kullanılmıştır. Okul yöneticileri ve yönetici adaylarına program öncesinde bir ön-test ve program sonrasında da bir son-test uygulanmıştır. Programın okul yöneticileri ve yönetici adayları üzerindeki anlamlı etkisi veri madenciliği ile değerlendirilmiştir. Ayrıca programa katılmayan yeni yönetici adaylarının karar verme yeteneklerini geliştirmek için bu programa ihtiyacı olup olmadığı yine veri madenciliği analizleri ile ortaya konabilecektir.

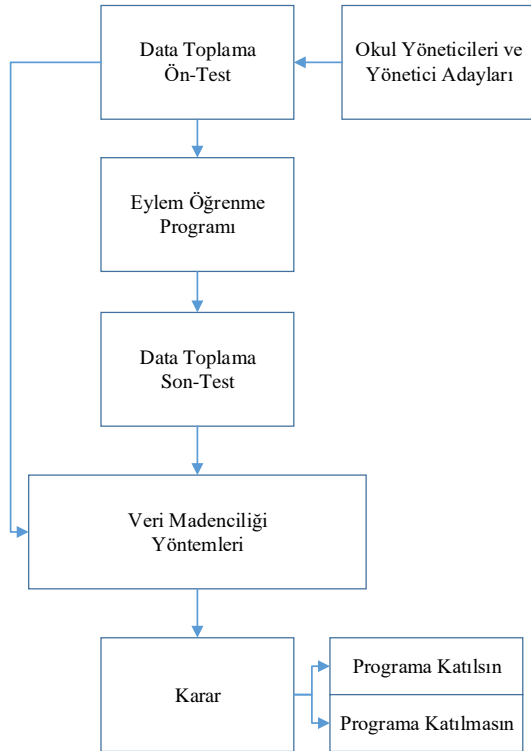
Çalışmanın organizasyonu şöyledir; ikinci bölümde yöntem, veri toplama, çalışma gurubu,



veri madenciliği yöntemlerinden bahsedilmiştir. Bölüm 3’de deneysel çalışmalar ve elde edilen sonuçlar verilmiştir. Nihayet son bölümde ise elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Çalışmada benimsenen yöntemin blok gösterimi Şekil 1’de verilmiştir. Şekil 1’den de görüleceği üzere, okul yöneticileri ve yönetici adaylarına hem eylem öğrenme programı öncesinde hem de sonrasında testler uygulanmaktadır. Program öncesinde ve sonrasında okul yöneticileri ve yönetici adaylarının karar vermesindeki olumlu etki veri madenciliği yöntemleri ile tahmin edilmektedir.



Şekil 1. Önerilen yöntemin blok gösterimi

### 2.1. Verilerin toplanması

Çalışmada verilerin toplanması için Mann vd. [33] tarafından geliştirilen ve Deniz [34] tarafından Türkçeye uyarlanan Melbourne Karar Verme Ölçeği I-II (MKVÖ) kullanılmıştır. Ölçek iki kısımdan oluşmaktadır. Ölçeğin birinci kısmı, karar vermede özsaygının belirlenmesi için hazırlanmıştır. Bu kısım, üçü ters olmak üzere altı maddeden oluşmaktadır. Ölçeğin ikinci kısmı

ise; karar verme stillerinin ölçüldüğü 22 maddeden oluşmaktadır. Dikkatli (6 madde), kaçınan (6 madde), erteleyici (5 madde) ve panik (5 madde) karar verme stillerinden oluşan dört alt faktörden oluşmaktadır [34].

### 2.2. Çalışma grubu

Araştırmada yer alan katılımcılar tesadüfi/seçkisiz olmayan örnekleme tekniklerinden amaçlı örnekleme yöntemi ile belirlenmiştir. Tesadüfi/seçkisiz olmayan örnekleme tekniğinden olan amaçlı örnekleme, çalışmanın amacına uygun, birtakım ölçütleri karşılayan ya da belli özellikleri taşıyan katılımcıların araştırmada yer alması gerektiğinde tercih edilen bir yöntemdir [35, 36]. Bu bağlamda araştırmanın amacı doğrultusunda katılımcıların belirlenmesinde gönüllülük kriterine dikkat edilmiştir. Ayrıca her bir grubun üyeleri seçilirken farklı deneyimlere sahip olmaları göz önünde bulundurulmuştur; yöneticilik deneyimi olan kimseler farklı gruplara dahil edilerek sürecin daha verimli olması sağlanmıştır. Eğitime katılanların demografik özellikleri Tablo 1’de gösterildiği gibidir.

Tablo 1. Katılımcıların Demografik Özellik Tablosu

Öğretmen	%	Yönetici	%	Yöneticilik Deneyimi
25	66	13	34	15

Tablo 1’de görüldüğü gibi deney grubu 38 katılımcıdan meydana gelmiştir. Bu grubun 25’i (%66) öğretmen ve 13’ü’ (%34) yöneticidir. Tabloda belirtildiği üzere, 15 katılımcı yöneticilik deneyimine sahiptir.

### 2.3. Verilerin analizi

Verilerin analizi sürecinde veri madenciliği teknikleri kullanılmıştır. Veri madenciliği, işlenmemiş ham verinin işlenerek değerli hale getirildiği süreç olarak tanımlanabilir. Veri madenciliğinde, veri kümeleme veya etiketleme, birliktelik kuralları ve veri dizileri analizi olarak adlandırılan üç temel bileşen bulunmaktadır. Bu çalışmada veri madenciliğinin veri kümeleme (veri sınıflandırma) ve etiketleme bileşenleri kullanılmıştır. Veri etiketleme, hem eğiticili

(danışmanlı) hem de eğiticiyiz (danışmansız) olarak gerçekleştirilmektedir. Eğiticiyiz sınıflandırma işleminde, veriler, belirlenen bir dizi kuralların yardımıyla bir dizi kümeye ayrılırlar. Eğiticiyiz sınıflamada ise sınıf etiketleri bilinen bir grup veri kullanılarak veriler ile sınıf etiketleri arasında bir bağ kurulmaya çalışılır ve bu bağ daha sonra sınıf etiketleri bilinmeyen veri elemanlarının sınıflandırılması için kullanılır [37, 38].

### 2.3.1. Karar ağaçları

Karar ağaçları iyi bilinen, etkili ve çok kullanılan veri sınıflandırma yaklaşımıdır [39]. Ayrıca karar ağaçları parametrik olmayan eğiticiyiz sınıflandırma yöntemi olarak da bilinirler. Karar ağaçlarının amacı, girdi veri kümesinden elde edilen basit karar kurallarını öğrenerek bir test örneğinin sınıf etiketini tahmin eden bir model oluşturmaktır. Bir karar ağacının yapısı, sırasıyla, yaprak ve iç düğüm gibi iki tür düğüm içerir. Bir yaprak, o yaprağa ulaşan eğitim örneklerinin çoğunluğunun oyu ile belirlenen bir sınıf etiketini tutar. Ayrıca, her iç düğüm, özelliklerle ilgili bir sorudur ve bu sorunun cevabına göre dallanmalar oluşturulmaktadır.

### 2.4. Diskriminant analiz

Diskriminant analizi, bir test örneğini sınıflandırmak için kullanılan giriş özelliği alanına dayalı bir dizi denklem üretir [40]. Diskriminant analizi, iki olası amacı göz önünde bulundurur. İlk amaç, bir test örneğini sınıflandırmak için tahmini bir denklem bulur. İkinci amaç, özellikler arasında var olabilecek ilişkileri daha iyi anlamak için tahmin edici denklemi yorumlamaya zorlamaktadır.

### 2.3.3. Destek vektör makineleri (DVM)

Destek vektör makineleri (DVM), sınıflandırma ve regresyon problemleri için kullanılan, istatistiksel öğrenme teorisine dayalı iyi bilinen bir makine öğrenmesi yöntemidir [41]. Genel olarak DVM tekniği, başlangıçta iki sınıflı doğrusal olarak ayırt edilebilen verilerin sınıflandırılması için tasarlanmış olsa da teknik daha sonra çok sınıflı ve doğrusal olmayan

verilerin sınıflandırılması için geliştirilmiştir. DVM, sınıflandırılacak öznitelikleri, öznitelik uzayında inceler ve sınıflar arasındaki sınırı belirleyecek optimum hiper düzlemi bulmak için optimizasyon algoritmaları kullanır.

### 2.3.4. k-EYK

k-en yakın komşular (k-EYK) sınıflandırıcısı en basit, etkili ve parametrik olmayan sınıflandırma yaklaşımı olarak bilinir [42]. k-EYK sınıflandırma prosedüründe, tüm eğitim verileri, önceden belirlenmiş bir mesafe fonksiyonuna ve en yakın k komşu sayısına göre test verisinin sınıflandırılması için kullanılır. Diğer bir ifade ile, k-EYK yaklaşımı başlangıçta Öklit, Mahalanobis ve vb. bir mesafe fonksiyonu ile test örneği ve eğitim örnekleri arasında bir benzerlik ölçüsü hesaplar. Daha sonra, hesaplanan benzerlik ölçümüne dayanarak, test örneğinin k-en yakın komşuları belirlenir. Test örneğinin sınıf etiketi, önceden belirlenmiş k en yakın komşuların etiketlerinin çoğunluk oyu ile belirlenir.

### 2.3.5. Birleştirilmiş sınıflandırıcılar

Birleştirilmiş sınıflandırıcıların, özgün sınıflandırıcılardan oluştuğu bilinmektedir [43]. Diğer bir deyişle, bir birleştirilmiş sınıflandırıcı, özgün sınıflandırıcıların kararlarını bir şekilde birleştirerek örnek bir test sınıfı etiketi belirler. Birleştirilmiş sınıflandırıcı, çoğu zaman onu oluşturan özgün sınıflandırıcılardan çok daha iyi bir başarı elde eder. Belirtildiği gibi, birleştirilmiş sınıflandırıcı çeşitli sınıflandırıcıların kararını birleştirmek için torbalama ve hızlandırma gibi bazı yöntemler kullanır. Torbalama ve hızlandırma, veri madenciliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan iki iyi bilinen birleştirilmiş sınıflandırıcı yöntemidir. Torbalama, orijinal veri kümesinden eğitim için ek veri üretmek tahminlerin varyansını azaltır. Bu, orijinal verilerle aynı boyuttaki çoklu kümeler üretmek için tekrarlamalı kombinasyonlar kullanılarak gerçekleştirilir. Eğitim setinin artan büyüklüğü sadece varyansı azaltmakta, beklenen sonuca göre tahmini pek az farkla düzenlemektedir. Ayrıca, hızlandırma iki aşamalı bir yaklaşım olduğu bilinmektedir. İlk aşamada, bir dizi ortalama performans gösteren model üretmek

için orijinal verilerin alt kümelerini kullanır. İkinci aşamada ise, önceki performansların oylama şeması kullanılıp birleştirilmesiyle performans artırılır [43].

### 3. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada kullanılan bütün veri madenciliği teknikleri MATLAB ortamında uygulanmıştır. Ayrıca çalışmada kullanılan very seti EK-1'de verilmiştir. Veri madenciliği teknikleri ile yapılan deneylerde iki farklı senaryo ele alınmıştır. Bunlardan birincisinde, eylem öğrenme eğitim sürecine katılmış ve katılmamış okul yöneticisi ve yönetici adaylarının oluşturduğu kümelenmeleri tahmin etmek için 28 ölçek maddesinin tümü kullanılmıştır. İkinci senaryoda ise her ölçek boyutu kendi içinde eğitime katılmış ve eğitime katılmamış okul yöneticisi veya adaylarını (kümelenmeleri) tahmin etmek için kullanılmıştır. Elde edilen en iyi doğruluk değerleri kalın yazı tipiyle gösterilmiştir. Tablo 2, ilk senaryo için elde edilen doğruluk değerlerini göstermektedir. Tablo 2'de görüldüğü üzere, doğruluk değerleri %47,4 ile %98,7 arasında dağılmaktadır. Diğer bir deyişle, en düşük doğruluk oranı olan %47,4 değeri ham k-EYK, hızlandırılmış ağaçlar ve RUSboost ağaçlar teknikleri tarafından üretilirken, en yüksek doğruluk olan %98,7 değeri ise kübik DVM, ağırlıklı k-EYK ve Altuzay EYK sınıflandırıcıları tarafından üretilmiştir.

Tüm karar ağaçları teknikleri %89,5'lük doğruluk değeri üretirken, doğrusal diskriminant

**Tablo 2.** Birinci senaryo için elde edilen tahmin doğruluk değerleri

Veri Yöntemi	Madenciliği Sınıflandırıcı Tipi	Doğruluk (%)
Karar Ağaçları	İyi Ağaç	89,5
	Orta Ağaç	89,5
	Ham Ağaç	89,5
Diskriminant Analiz	Doğrusal	94,7
	Diskriminant	80,3
	Kuadratik	
DVM	Doğrusal DVM	97,4
	Kuadratik DVM	97,4
	<b>Kübik DVM</b>	<b>98,7</b>
	İyi Gaussian DVM	57,9
	Orta Gaussian DVM	93,4
	Ham Gaussian DVM	63,2
	k-EYK	İyi k-EYK
Orta k-EYK		97,4
Ham k-EYK		47,4
Kosinüs k-EYK		89,5
Kübik k-EYK		96,1
<b>Ağırlıklı k-EYK</b>		<b>98,7</b>
Birleştirilmiş Sınıflandırıcılar	Hızlandırılmış Ağaçlar	47,4
	Torbalı Ağaçlar	93,4
	Altuzay	94,7
	Diskriminant	<b>98,7</b>
	<b>Altuzay EYK</b>	
RUSBoost Ağaçları	47,4	

yöntemi %94,7 ve kuadratik diskriminant yöntemi %80,3'lük bir doğruluk değeri üretmiştir. İyi Gaussian ve ham Gaussian DVM teknikleri hariç, diğer tüm DVM teknikleri %90'nın üzerinde doğruluk değerleri üretmişlerdir. Doğrusal ve kuadratik DVM teknikleri %97,4'lük doğruluk değeri ve kübik DVM tekniği ise en yüksek doğruluk olan %98,7 değerini elde etmiştir. Daha önce de belirtildiği üzere, ham k-EYK yöntemi en düşük doğruluk oranı olan %47,4 değerini üretmiştir. Ayrıca, kosinüs k-EYK tekniği %89,5 doğruluk değeri üretirken, diğer tüm k-EYK yöntemleri yine %90 üzerinde doğruluk değerleri elde etmişlerdir. Birleştirilmiş sınıflandırıcılardan olan hızlandırılmış ağaçlar ve RUSBoost Ağaçları yöntemleri %47,4 olan en düşük başarımlarını üretirken, altuzay EYK yöntemi en yüksek başarımlarını %98,7 değerini elde etmiştir.

İkinci senaryo çerçevesinde karar vermede Öz saygı boyutu giriş olarak kullanıldığında elde edilen tahmin doğruluk oranları Tablo 3'teki gibidir.

**Tablo 3.** İkinci senaryo için karar vermede Öz saygı boyutu için elde edilen tahmin doğruluk değerleri

Veri Madenciliği Yöntemi	Sınıflandırıcı Tipi	Doğruluk (%)
Karar Ağaçları	İyi Ağaç	56,6
	Orta Ağaç	56,6
	Ham Ağaç	50,0
Diskriminant Analiz	Doğrusal	50,0
	Diskriminant	
	Kuadratik Diskriminant	53,9
DVM	Doğrusal DVM	51,3
	<b>Kuadratik DVM</b>	<b>57,9</b>
	Kübik DVM	53,9
	İyi Gaussian DVM	52,6
	Orta Gaussian DVM	43,3
	Ham Gaussian DVM	55,3
k-EYK	İyi k-EYK	47,4
	Orta k-EYK	53,9
	Ham k-EYK	47,4
	Kosinüs k-EYK	51,3
	Kübik k-EYK	56,6
	Ağırlıklı k-EYK	47,4
Birleştirilmiş Sınıflandırıcılar	Hızlandırılmış Ağaçlar	50,0
	Torbalı Ağaçlar	55,3
	Altuzay Diskriminant	52,6
	Altuzay k-EYK	48,7
	RUSBoost Ağaçları	48,7

Karar vermede öz-saygı boyutu, 6 ölçek maddesini kapsamaktadır. Tablo 3'de görüldüğü gibi, en yüksek doğruluk oranı olan %57,9 değeri kuadratik DVM tekniği ile elde edilmiştir. Ayrıca, en düşük doğruluk oranı olan %43,3 değeri, orta Gaussian DVM yaklaşımı ile üretilmiştir. Tablo 2'deki önemli bir çıkarım, karar ağaçları sınıflandırma yaklaşımlarının tutarlı doğruluk puanları oluşturmasıdır. Ham ve orta ağaç teknikleri %56,6'lık doğruluk değerlerini üretirken, iyi ağaç yöntemi %50,0 doğruluk skoru elde etmiştir. Doğrusal diskriminant yöntemi de %50,0 doğruluk değeri üretirken, kuadratik diskriminant yönteminin başarımı %53,9'dur. DVM sınıflandırma yöntemlerinden olan orta Gaussian DVM tekniği %43,3'lük doğruluk oranı ile en düşük başarımı

elde etmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, kuadratik DVM tekniği en yüksek doğruluk oranını (%57,9) elde etmiştir. Kübik k-EYK sınıflandırıcısı %56,6'lık doğruluk değeri ile k-EYK sınıflandırıcıları içindeki en iyi başarımları üretmiştir. Ayrıca, iyi, ham ve ağırlıklı k-EYK yöntemleri %47,4'lük doğruluk değerleri üretmişlerdir. Birleştirilmiş sınıflandırıcılar için de torbalı ağaçlar yöntemi %55,3'lük en iyi doğruluk değerini üretmiştir. Ayrıca en düşük başarımları olan %48,7 değeri, altuzay k-EYK ve RUSBoost ağaçları yöntemleri tarafından üretilmişlerdir.

İkinci senaryonun panik karar verme boyutu girdi olarak kullanıldığında, elde edilen tahmin sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir.

**Tablo 4.** İkinci senaryo için Panik karar verme boyutunda elde edilen tahmin doğruluk değerleri

Veri Madenciliği Yöntemi	Sınıflandırıcı Tipi	Doğruluk (%)
Karar Ağaçları	<b>İyi Ağaç</b>	<b>89,5</b>
	<b>Orta Ağaç</b>	<b>89,5</b>
	<b>Ham Ağaç</b>	<b>89,5</b>
Diskriminant Analiz	Doğrusal	76,3
	Diskriminant	
	Kuadratik Diskriminant	88,2
DVM	Doğrusal DVM	77,6
	Kuadratik DVM	84,2
	Kübik DVM	84,2
	İyi Gaussian DVM	86,8
	Orta Gaussian DVM	82,9
	Ham Gaussian DVM	82,9
k-EYK	İyi k-EYK	82,9
	Orta k-EYK	84,2
	Ham k-EYK	47,4
	Kosinüs k-EYK	81,6
	Kübik k-EYK	84,2
	Ağırlıklı k-EYK	81,6
Birleştirilmiş Sınıflandırıcılar	Hızlandırılmış Ağaçlar	47,4
	Torbalı Ağaçlar	88,2
	Altuzay Diskriminant	78,9
	Altuzay k-EYK	84,2
	RUSBoost Ağaçları	47,4

Panik karar verme boyutu beş ölçek maddesini kapsamaktadır. Tablo 4'ten görüleceği üzere, en yüksek doğruluk değeri %89,5'i bütün karar ağaçları yöntemleri üretmiştir. İkinci en yüksek doğruluk oranı olan %88,2 değerini kuadratik diskriminant sınıflandırıcı yöntemi üretmiştir.

Ayrıca doğrusal diskriminant yöntemi de %76,3 doğruluk değerini elde etmiştir. Bütün DVM teknikleri genel anlamda başarılı doğruluk değerleri üretmişlerdir. Kuadratik ve kübik DVM yöntemleri %84,2 ve orta ve ham Gaussian DVM yöntemleri ise %82,9 doğruluk değerlerini üretmişlerdir. Ham k-EYK yöntemi %47,4'lük doğruluk değeri ile en düşük başarıyı elde etmiştir. Diğer bütün k-EYK yöntemleri %80'in üzerinde doğruluk değerleri ile ilgili sınıflandırma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Orta ve kübik k-EYK yöntemleri %84,2'lik doğruluk değerleri üretirken, kosinüs ve ağırlıklı k-EYK metotları %81,6'lık başarımlarını değerleri elde etmişlerdir.

**Tablo 5.** İkinci senaryo için Dikkatli karar verme boyutunda elde edilen tahmin doğruluk değerleri

Veri Madenciliği Yöntemi	Sınıflandırıcı Tipi	Doğruluk (%)
Karar Ağaçları	İyi Ağaç	90,8
	Orta Ağaç	90,8
	Ham Ağaç	90,8
Diskriminant Analiz	Doğrusal	94,7
	Diskriminant	
	Kuadratik	90,8
DVM	Diskriminant	
	<b>Doğrusal DVM</b>	<b>96,1</b>
	Kuadratik DVM	92,1
	Kübik DVM	93,4
	İyi Gaussian DVM	88,2
	Orta Gaussian DVM	93,4
Ham Gaussian DVM	93,4	
k-EYK	İyi k-EYK	93,4
	Orta k-EYK	92,1
	Ham k-EYK	47,4
	Kosinüs k-EYK	89,5
	Kübik k-EYK	93,4
	Ağırlıklı k-EYK	94,7
Birleştirilmiş Sınıflandırıcılar	Hızlandırılmış Ağaçlar	47,4
	Torbalı Ağaçlar	89,5
	<b>Altuzay</b>	<b>96,1</b>
	<b>Diskriminant</b>	
	Altuzay k-EYK	92,1
	RUSBoost Ağaçları	47,4

Hızlandırılmış ve RUSBoost ağaçları yöntemleri %47,4'lük en kötü doğruluk değerlerini elde ederken, torbalı ağaçlar yöntemi daha önce de belirtildiği üzere %88,2'lik en iyi ikinci doğruluk değerini üretmiştir. Altuzay diskriminant ve

altuzay k-EYK birleştirilmiş sınıflandırılmış yöntemleri sırası ile %78,9 ve %84,2'lik başarımlarını üretmişlerdir.

İkinci senaryo çerçevesinde Dikkatli karar verme boyutu giriş olarak kullanıldığında elde edilen tahmin doğruluk değerleri Tablo 5'teki gibi bulunmuştur.

Dikkatli karar verme boyutu 6 ölçek maddesini kapsamaktadır ve elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5'te görüldüğü gibi, en yüksek doğruluk oranı olan %96,1'i, altuzay diskriminant birleştirilmiş sınıflandırıcı ve doğrusal DVM teknikleri tarafından üretilmiştir. Ayrıca, en iyi ikinci doğruluk oranı %94,7 değerini de doğrusal Diskriminant ve ağırlıklı k-EYK yöntemleri elde etmişlerdir. Bütün karar ağaçları yöntemleri ve kuadratik diskriminant analiz yöntemi %90,8'lik bir başarımlarını elde etmişlerdir. İyi Gaussian DVM yöntemi hariç diğer bütün DVM yöntemleri %90'nın üzerinde bir başarımlarını elde etmişlerdir. Kübik, orta ve ham Gaussian DVM teknikleri %93,4'lük bir doğruluk ile tahminlerini gerçekleştirmişlerdir. Ham k-EYK yöntemi, %47,4'lük doğruluk değeri ile k-EYK yöntemleri içerisinde en düşük başarımlarını elde ederken, iyi ve kübik k-EYK yöntemleri %93,4'lük doğruluk değerleri üretmişlerdir. Ağırlıklı k-EYK yöntemi ise %94,7'lük bir başarımlarını elde etmiştir. Hızlandırılmış ağaçlar ve RUSBoost ağaçlar teknikleri daha öncede ifade edildiği üzere en düşük başarımlarını değerini elde ederken, Altuzay diskriminant yöntemi en iyi başarımlarını üretmiştir. Altuzay k-EYK ve torbalı ağaçlar yöntemleri sırası ile %92,1 ve %89,5'lik başarımlarını değerleri üretmişlerdir.

İkinci senaryo çerçevesinde Kaçınan karar verme boyutu giriş olarak kullanıldığında elde edilen tahmin doğruluk değerleri Tablo 6'daki gibi bulunmuştur.

Kaçınan karar verme boyutu 6 ölçek maddesini kapsamakta ve elde edilen sonuçlar Tablo 6'te verilmiştir. Tablo 6'te elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, kaçınan karar verme boyutunun eğitimli ve eğitimli olmayan katılımcıları ayırmada yeterince etkili olduğu görülmektedir. Karar ağaçları, doğrusal diskriminant analiz, doğrusal DVM, iyi, orta ve kosinüs k-EYK, altuzay diskriminant ve k-EYK yöntemleri %93,4'lük doğruluk değeri elde etmişlerdir. Ey iyi başarımlarını ise %97,4'lük

doğruluk değeri ile torbalı ağaçlar yöntemi üretmiştir. Diğer taraftan, en düşük başarımlık değeri olan %47,4 doğruluk değerini sırası ile ham k-EYK, hızlandırılmış ve RUSBoost ağaçlar yöntemleri üretmiştir.

**Tablo 6.** İkinci senaryo için Kaçınan karar verme boyutunda elde edilen tahmin doğruluk değerleri

Veri Madenciliği Yöntemi	Sınıflandırıcı Tipi	Doğruluk (%)
Karar Ağaçları	İyi Ağaç	93,4
	Orta Ağaç	93,4
	Ham Ağaç	93,4
Diskriminant Analiz	Doğrusal	93,4
	Diskriminant	
	Kuadratik	96,1
DVM	Doğrusal DVM	93,4
	Kuadratik DVM	94,7
	Kübik DVM	90,8
	İyi Gaussian DVM	78,9
	Orta Gaussian DVM	96,1
	Ham Gaussian DVM	90,8
k-EYK	İyi k-EYK	93,4
	Orta k-EYK	93,4
	Ham k-EYK	47,4
	Kosinüs k-EYK	93,4
	Kübik k-EYK	96,1
	Ağırlıklı k-EYK	96,1
Birleştirilmiş Sınıflandırıcılar	Hızlandırılmış Ağaçlar	47,4
	<b>Torbalı Ağaçlar</b>	<b>97,4</b>
	Altuzay	93,4
	Diskriminant	93,4
	Altuzay k-EYK	93,4
	RUSBoost Ağaçları	47,4

İkinci senaryo çerçevesinde Erteleyici karar verme boyutu giriş olarak kullanıldığında elde edilen tahmin sonuçları Tablo 7'deki gibidir.

6 ölçek maddesini kapsayan erteleyici karar verme boyutu ile ilgili elde edilen sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'da görüldüğü gibi, erteleyici karar verme boyutunun doğruluk sonuçları kaçınan karar verme boyutunun sonuçlarına oranla daha kötüdür. En yüksek doğruluk oranı olan %75,0 ve en düşük doğruluk oranı olan %47,4 sırasıyla doğrusal DVM ve ham k-EYK yöntemleri ile elde edilmiştir. %65,8 doğruluk oranı, iyi ve orta ağaç, kübik k-EYK ve

hızlandırılmış ve RUSBoost ağaçları yöntemleri ile elde edilmiştir.

**Tablo 7.** İkinci senaryo için Erteleyici karar verme boyutunda elde edilen tahmin doğruluk değerleri

Veri Madenciliği Yöntemi	Sınıflandırıcı Tipi	Doğruluk (%)
Karar Ağaçları	İyi Ağaç	65,8
	Orta Ağaç	65,8
	Ham Ağaç	63,2
Diskriminant Analiz	Doğrusal	71,1
	Diskriminant	
	Kuadratik	67,1
DVM	<b>Doğrusal DVM</b>	<b>75,0</b>
	Kuadratik DVM	61,8
	Kübik DVM	56,6
	İyi Gaussian DVM	61,8
	Orta Gaussian DVM	68,4
	Ham Gaussian DVM	67,1
k-EYK	İyi k-EYK	64,5
	Orta k-EYK	64,5
	Ham k-EYK	47,4
	Kosinüs k-EYK	64,5
	Kübik k-EYK	65,8
	Ağırlıklı k-EYK	61,8
Birleştirilmiş Sınıflandırıcılar	Hızlandırılmış Ağaçlar	65,8
	Torbalı Ağaçlar	60,5
	Altuzay Diskriminant	69,7
	Altuzay k-EYK	56,6
	RUSBoost Ağaçları	65,8

#### 4. Sonuçlar

Elde edilen bulgular, veri madenciliğinin, eylem öğrenmenin, okul yöneticileri ve yönetici adaylarının karar vermelerine olumlu etkisinin belirlenmesinde gayet başarılı olduğunu göstermiştir. Uygulamada kullanılan birinci senaryonun, ikinci senaryoya oranla daha başarılı sonuçlar ürettiği görülmüştür. Bu durum, çok fazla ölçek maddesi ile yapılan sınıflandırma işlemlerinin daha başarılı olduğu gerçeğini bir kez daha göstermiştir. İkinci senaryo olarak gerçekleştirilen beş ayrı veri madenciliği uygulamalarında, kaçınan karar verme boyutunun diğer boyutlara oranla, eylem öğrenme sürecine katılmış yönetici ve yönetici adaylarının, sürece katılmamış yönetici ve yönetici adaylarından ayrımının daha başarılı bir

şekilde gerçekleştirildiği görülmüştür. Benzer şekilde dikkatli karar verme boyutu da başarılı sonuçların elde edildiği ikinci senaryo uygulamalarından biridir. İkinci senaryolar göz önüne alındığında, en kötü sınıflandırma başarımının karar vermede öz saygı boyutunda elde edildiği görülmüştür. Veri madenciliği teknikleri açısından değerlendirme yapıldığında, DVM tekniklerinin genel olarak başarılı sonuçlar ürettikleri görülmüştür. Karar ağaçları, birleştirilmiş sınıflandırıcılar ve k-EYK yöntemlerinin de başarılı sonuçların elde edilmesinde kullanılabilecek diğer veri madenciliği teknikleri olduğu ortaya çıkmıştır.

## 5. Kaynaklar

1. Balyer, A. (2014). School principals' role priorities. *Journal of Theory and Practice in Education*, **10**(1), 24-40.
2. Berg, E. E. (2009). *Perceived effects of teachers' unions on administrators' and teachers' roles and morale*. Ed.D. dissertation, Walden University, United States -- Minnesota.
3. Hallinger, P. (1992). The evolving role of American principals: From managerial to instructional to transformational leaders. *Journal of Educational Administration*, **30**(3).
4. Kincade, E. (2013). *The effect of principal leadership and teacher morale on student achievement (Order No. 3642269)*. Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (1630099753).
5. Education Department (2002). *Continuing professional development for school excellence-consultation paper on continuing professional development of principals*. Hong Kong: The Printing Department.
6. Yan, W., & Ehrich, L. C. (2009). Principal preparation and training: A look at China and its issues. *International Journal of Educational Management*, **23**, 51-64.
7. Davis, S., Darling-Hammond, L., LaPointe, M., & Meyerson, D. (2005). *School leadership study: Developing successful principals (Review of Research)*. Stanford, CA: Stanford University, Stanford Educational Leadership Institute.
8. Darling-Hammond, L., LaPointe, M., Meyerson, D., Orr, M. T., & Cohen, C. (2007). *Preparing school leaders for a changing world: Lessons from exemplary leadership development programs*. Stanford, CA: Stanford University, Stanford Educational Leadership Institute.
9. Hallinger, P., Shaobing, T., & Jiafang, L. (2017). Learning to make change happen in Chinese schools: adapting a problem-based computer simulation for developing school leaders. *School Leadership & Management*, **37**(1-2), 162-187.
10. Orr, M. T. (2006). Mapping innovation in leadership preparation in our nation's schools of education. *Phi Delta Kappan*, **87**(7), 492-499.
11. Aykut, C. M. (2006). *Türkiye ve ABD'de okul yöneticilerinin yetiştirilmesinin karşılaştırılması*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü.
12. Balyer, A., & Gündüz, Y. (2011). Değişik ülkelerde okul müdürlerinin yetiştirilmesi: Türk eğitim sistemi için bir model önerisi. *Kuramsal Eğitimbilim*, **4**(2), 182-197.
13. Cemaloğlu, N. (2005). Türkiye'de okul yöneticisi yetiştirme ve istihdamı varolan durum, gelecekteki olası gelişmeler ve sorunlar. *Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, **25**(2), 249-274.
14. Işık, H. (2003). Okul müdürlerinin yetiştirilmelerinde yeni bir model önerisi. *Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, **24**, 206-211.
15. Kocabaş, İ., & Yirci, R. (2010). Okul müdürü yetiştirmede yeni bir model önerisi: Mentorluk. *V. Ulusal Eğitim Yönetimi Kongresi Bildiriler Kitabı*.
16. Özdemir, T. Y. (2012). *İl eğitim denetmen ve yardımcıların mesleki gelişimlerini devam ettirmede e-mentorluk modeli*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü Eğitim Yönetimi Teftişi Planlaması ve Ekonomisi Anabilim Dalı, Elazığ.
17. Turhan, M., & Karabatak, S. (2015). Okul liderlerinin web tabanlı yetiştirilmesinde problem temelli öğrenme: teorik bir model önerisi. *Kuram ve Uygulamada Eğitim Yönetimi*, **21**(3): 395-424.
18. Weindling, D. (2004). *Innovation in headteacher induction*. Nottingham: National College for School Leadership.
19. Acker-Hocevar, M., Pisapia, J. R., & Coukos-Semmel, E. D. (2002). *Bridging the abyss: Adding value and validity to leadership development through action learning—cases-inpoint*. (Report No.EA 031 828). Eugene OR: National Center for Research on Educational Administration.
20. Boulden, G. P., & Laat, R. D. (2005). Peer group learning in Roche Pharma development. *Action Learning: Research and Practice*, **2**(2): 197-204. doi:10.1080/14767330500207043
21. Hicks, S. A. (2000). *Action learning: Patterns in the practice of program design*. Published Dissertation, North Carolina State University, USA.

22. Lamm, S. (2000). *The connection between action reflection learning and transformative learning: An awakening of human qualities in leadership*. Unpublished doctoral dissertation, Teachers College, Columbia University, New York, **28**.
23. Lee, T. B. (2005). *A case study of an action learning program with regard to leadership behaviors and characteristics*. Doctoral dissertation, George Washington University.
24. Marquardt, M. (2004). *Optimizing the power of action learning*. Davies-Black Publishing.
25. Skipton Leonard, H. & Lang, F. (2010). Leadership development via action learning. *Advances in Developing Human Resources*, **12(2)**: 225-240.
26. Taylor, T. (2010). *Action learning as a vehicle for 21st century alignment in public education*. Doctoral dissertation, University of La Verne.
27. Boshyk, Y., & Dilworth, R. (Eds.). (2010). *Action learning: History and evolution*. Palgrave Macmillan.
28. Dunn, L. (2002). *Theories of learning. Learning and Teaching Briefing Papers Series, Oxford Centre for Staff and Learning Development OCSLD*, Oxford Brookes University.
29. Marquardt, M. (2003). Developing global leaders via action learning programs: a case study at Boeing. *Thai Journal of Public Administration*, **3(3)**: 133-157.
30. Pedler, M. (2008). *Action learning for managers*. Gower Publishing Ltd.
31. Brockbank, A., & McGill, I. (2003). *The action learning handbook: powerful techniques for education, professional development and training*. Routledge.
32. Bursalıoğlu, Z. (2002). *Okul Yönetiminde Yeni Yapı ve Davranışlar*. Ankara: Pegem Akademi.
33. Mann, L., Radford, M., Burnett, P., Ford, S., Bond, M., Leung, K., ... & Yang, K. S. (1998). Cross-cultural differences in self-reported decision-making style and confidence. *International Journal of Psychology*, **33(5)**: 325-335.
34. Deniz, M. E. (2004). Investigation of the relation between decision-making self-esteem, decision making styles and problem solving skills of university students. *Eurasian Journal of Educational Research*, **4(15)**: 23-35.
35. Büyüköztürk, Ş., Çakmak, E. K., Akgün, Ö. E., Karadeniz, Ş., ve Demirel, F. (2014). *Bilimsel araştırma yöntemleri*. Ankara: Pegem Akademi.
36. Christensen, L. B., Johnson, B., & Turner, L. A. (2015). *Araştırma yöntemleri: Desen ve analiz*. Ankara: Anı Yayıncılık.
37. Luan, J. (2002). *Data mining applications in higher education*. John Wiley and Sons, New York.
38. Şengür, D. (2013). *Öğrencilerin akademik başarılarının veri madenciliği metotları ile tahmini*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Eğitimi.
39. Safavian, S. R., & Landgrebe, D. (1991). A survey of decision tree classifier methodology. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, **21**: 660-674.
40. Duda, R. O., Hart, P. E., & Stork, D. G. (2012). *Pattern classification*. John Wiley & Sons.
41. Hearst, M. A., Dumais, S. T., Osuna, E., Platt, J., & Scholkopf, B. (1998). Support vector machines, *IEEE Intelligent Systems and their Applications*, **13(4)**: 18-28.
42. Biçer, P. (2002). *Veri madenciliği: Sınıflandırma ve tahmin yöntemlerini kullanarak bir uygulama*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
43. Sengur, A. (2012). Support vector machine ensembles for intelligent diagnosis of valvular heart disease. *Journal of Medical Systems*, **36(4)**: 2649-2655.



Dönüş Şengür, Muhammed Turhan, Songül Karabatak

EK-1. Çalışmada Kullanılan Veri Seti

kv1	kv2	kv3	kv4	kv5	kv6	kv7	kv19	kv21	kv26	kv28	kv8	kv10	kv12	kv14	kv18	kv22	kv9	kv15	kv17	kv20	kv23	kv25	kv11	kv13	kv16	kv24	kv27		
4	2	4	5	3	5	1	1	1	2	1	5	4	5	5	5	5	1	1	1	1	4	3	2	1	1	1	1		
5	5	5	5	4	4	3	2	2	2	2	5	4	4	5	4	5	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2	1	2	
4	4	4	4	3	4	4	2	2	4	4	2	2	2	2	2	4	2	2	2	2	2	4	2	2	2	2	2	3	
5	3	5	5	5	5	3	3	3	5	3	5	5	5	5	5	5	1	3	1	3	5	4	5	2	4	5	3		
4	4	5	4	4	2	4	2	2	4	2	5	5	5	5	5	5	2	2	4	2	2	2	2	2	2	4	2	2	
5	4	5	4	3	2	3	2	2	4	2	4	4	4	2	4	4	2	2	2	2	2	2	2	2	4	2	2	2	
4	5	4	5	3	5	2	2	2	1	2	4	4	4	5	5	4	2	1	2	3	2	2	1	1	4	2	2	2	
5	5	4	5	4	5	2	4	1	4	1	4	4	4	4	4	4	2	1	1	2	2	1	2	3	4	2	1	1	
4	5	4	5	4	5	2	4	1	2	1	4	4	4	4	4	5	1	1	1	1	2	2	1	1	4	3	2	2	
5	4	4	5	4	3	2	1	2	3	3	5	5	5	5	5	5	4	1	1	1	1	1	2	2	3	2	3	3	
5	5	5	5	4	3	2	3	4	3	2	4	4	4	4	4	4	3	1	1	3	2	3	2	3	4	2	2	2	
5	5	4	5	3	5	3	1	2	3	1	3	3	3	3	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	
4	4	4	4	4	5	2	4	4	2	1	4	4	4	4	4	5	1	1	1	1	4	1	2	4	4	4	2	4	
4	5	4	2	3	4	4	2	4	3	2	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	4	2	4	4	4	2	
4	2	4	3	4	2	2	3	2	4	2	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	
3	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	4	5	5	5	5	4	2	2	1	2	3	2	2	1	3	2	2	2	
4	4	4	3	4	4	2	3	3	3	1	4	4	4	5	4	4	1	1	2	2	3	2	3	1	4	3	2	2	
5	4	4	5	4	5	2	4	1	4	3	4	4	4	5	4	4	2	2	1	2	4	5	5	2	3	4	4	2	
5	4	4	5	4	3	2	3	3	3	3	4	5	5	5	4	4	2	2	2	2	2	4	3	1	2	3	3	2	
4	5	3	4	3	4	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	
5	2	5	5	5	3	2	2	1	2	1	5	4	5	5	4	5	2	1	2	2	2	3	2	1	2	1	1	1	
5	4	5	5	4	4	2	1	2	1	1	5	5	5	5	5	5	1	1	1	3	2	1	5	1	3	1	1	1	
2	3	3	2	3	4	4	2	2	2	3	5	2	5	5	1	5	1	1	3	2	2	3	3	3	2	3	3	3	
5	5	4	5	4	4	3	1	1	4	3	5	4	5	5	5	4	1	1	1	2	4	3	2	1	2	2	2	1	
4	4	3	4	4	4	4	4	2	1	2	4	4	4	5	4	2	2	4	2	2	2	1	1	2	4	2	1	1	
5	5	5	5	5	4	2	2	1	2	3	5	3	5	5	5	5	1	1	5	1	2	1	1	1	2	1	1	1	
5	5	5	4	5	4	4	3	2	2	4	5	4	4	5	4	4	2	2	4	2	2	4	2	4	2	4	4	3	
4	4	4	4	4	4	4	3	2	2	4	5	5	5	5	5	5	2	2	2	2	2	5	2	2	2	2	2	2	
5	1	5	5	4	4	2	2	3	2	3	2	4	5	5	4	5	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	
5	2	5	4	4	4	3	3	2	3	2	4	4	5	4	4	4	2	1	2	2	2	4	3	1	4	1	2	2	
3	1	2	1	2	2	5	4	5	5	5	3	3	3	3	3	3	5	4	5	5	4	5	5	5	4	5	5		
1	5	3	3	3	1	5	5	2	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	2	3	1	3	5	5	5	3	3	3	
3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	4	5	5	3	3	
3	3	3	4	3	3	3	2	3	3	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	2	3	2	3	4	3	5	3	3	
3	3	3	4	2	2	3	3	4	4	3	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	3	3	5	5	4	4	4	3	
4	4	3	4	3	3	3	5	2	3	5	4	3	4	4	3	3	3	3	2	3	2	5	3	3	3	3	3	3	
4	2	3	1	2	1	4	5	4	4	5	4	2	3	3	3	3	4	3	4	5	4	5	4	4	5	4	4	3	
4	1	4	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	2	2	5	3	3	5	4	3	3	
4	4	4	5	4	4	1	5	1	5	1	5	2	5	1	1	1	5	2	1	1	5	2	1	2	1	1	1	1	
5	5	5	5	5	5	2	5	1	5	1	5	2	5	1	2	1	5	2	1	2	4	2	2	1	2	2	2	2	
4	2	4	2	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	1	3	1	4	4	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	
4	2	4	2	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	1	3	1	4	4	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	
4	4	4	4	4	4	2	4	2	4	4	4	2	4	2	2	4	2	2	2	2	5	5	2	2	4	2	2	2	
5	4	5	4	4	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	2	2	5	2	2	2	3	2	2	3	
4	5	4	4	3	5	2	4	2	4	2	5	3	5	2	4	4	4	2	1	2	5	4	3	3	2	2	2	2	
5	5	5	5	4	4	2	5	1	5	2	4	2	4	2	5	4	4	4	1	4	5	5	4	2	2	2	2	4	
5	5	5	5	4	4	2	5	2	5	3	5	2	4	1	4	2	5	3	2	2	5	3	2	3	3	2	2	2	
5	5	5	2	4	3	1	5	2	1	2	5	1	5	1	1	1	5	3	2	1	5	1	1	3	3	1	1	1	
4	5	4	4	3	4	4	4	3	4	2	4	3	4	1	3	2	4	2	3	3	4	2	3	3	3	2	2	2	
4	5	5	5	3	5	3	4	1	4	2	3	2	3	1	1	1	4	1	1	2	4	1	1	1	1	1	1	1	
4	5	4	4	4	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	4	4	4	1	4	5	5	4	2	2	2	2	4	
5	4	4	4	4	3	3	4	2	5	2	5	2	4	2	4	3	4	3	2	2	4	2	2	3	2	2	2	2	
4	5	4	5	1	4	4	1	1	5	1	5	1	4	1	3	2	4	4	2	4	4	4	5	1	2	1	2	1	2
4	3	4	4	4	4	3	4	2	4	3	4	2	5	2	4	2	4	4	2	3	4	3	3	3	4	3	2	1	
5	2	5	5	4	4	1	5	1	5	1	5	1	5	1	1	1	5	1	1	1	4	1	1	2	1	1	1	1	
5	5	5	5	5	5	1	5	1	5	3	5	1	5	1	3	1	5	3	1	1	4	2	2	3	3	2	2	2	
5	5	5	5	5	4	2	5	1	5	4	5	1	5	1	2	1	5	3	1	2	5	2	1	2	2	2	2	2	
5	5	4	5	4	4	2	5	1	5	4	5	1	5	1	2	1	5	2	1	1	5	1	1	1	1	1	1	1	
5	3	5	5	5	5	4	1	5	1	5	1	5	1	5	1	2	1	5	1	2	1	5	2	1	2	1	1	1	
5	5	5	5	5	5	4	1	5	1	5	3	5	1	5	1	3	1	5	1	2	2	5	1	1	1	1	1	1	
3	5	4	3	4	4	3	5	1	4	2	5	2	5	1	2	2	3	2	1	1	5	2	2	2	2	1	1	1	
5	5	5	5	5	4	3	5	1	5	1	5	1	5	1	2	1	5	1	1	1	5	2	2	2	2	1	1	2	
5	5	4	5	5	5	3	5	1	5	1	5	1	5	3	3	2	5	2	2	1	4	2	2	1	1	1	1	1	
5	5	5	5	5	5	1	5	1	4	1	5	1	5	1	2	3	5	2	1	1	5	1	1	1	1	1	1	2	
5	5	5	5	5	5	3	5	1	4	2	5	2	5	1	2	3	5	1	1	2	5	1	2	2	1	2	2	2	
5	5	5	5	5	4	3	5	2	5	2	5	1	5	1	2	1	5	1	1	2	5	3	2	2	1	1	1	2	
5	3	5	5	5	4	1	5	1	4	1	5	1	5	1	2	1	5	1	2	1	5	3	1	2	2	2	1	1	



**FIRAT ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ, FEN BİLİMLERİ DERGİSİ**  
**TURKISH JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY (TJST)**  
**YAZIM ESASLARI / GUIDE FOR AUTHORS**  
<http://www.firat.edu.tr>

**Açıklama/Description**

Fen ve Mühendislik Bilimleri alanlarında özgün araştırma makaleleri (orijinal bir araştırmayı bulgu ve sonuçlarıyla yansıtan, bilime ve teknolojiye katkı sağlayan çalışmalar) Türkçe dilde Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Fen Bilimleri Dergilerinde, İngilizce olarak da "Turkish Journal of Science and Technology" dergisinde (uluslararası danışma kurullu ve hakemli) yayımlanır. Yazıların telif hakkı devri (copyright), dergi internet sayfasında sunulan form doldurulup imzalanmak suretiyle editörlüğe sunulur. Her yazı, konusu ile ilgili **3 (üç)** hakeme gönderilerek şekil ve içerik bakımından incelenir. Hakem görüşlerinde belirtilen eksikler tamamlandıktan sonra dergide yayınlanabilecek nitelikteki makaleler, yazarlar tarafından son baskı formatında editöre iade edilir. Dergide baskı taslağı (draft) haliyle makale içinde bulunabilecek hataların sorumluluğu yazarlara aittir.

**Yazışma Adresi/Corresponding address:** Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Editörlüğü, Fırat Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü 23119- Elazığ.  
e-mail: fenbilim@firat.edu.tr  
Tel: 0424 2122707, Fax: 0424 2369955

**İLK SUNUŞ FORMATI /Submission of Manuscript**

Metin; sayfanın tek yüzüne, bilgisayar ile Office 2000 veya daha üst bir yazı programı kullanılarak çift aralıklı, kenarlarda yeterli boşluk (25 mm) bırakılarak, Times New Roman karakteri ve 12 punto kullanılarak A4 (210x297mm) formunda beyaz kağıda yazılmalıdır. Eserler, kaynaklar ve şekiller dahil 15 sayfayı geçmemelidir (baskı formatında max. 10 sayfa). Şekil, grafik, resim ve formüller orijinal veya temiz ve net bir şekilde bilgisayardan baskıya hazır halde üretilmiş olmalıdır. İlk sunuş formatında, üst bilgi ve alt bilgi kısmına hiç bir şekilde yazı yazılmamalı yalnızca alt bilgi kısmında belgeye sayfa numarası verilmelidir. Belge içinde hiçbir şekilde otomatik numaralandırma kullanılmamalıdır. Yazılar, biri orijinal ikisi fotokopi olmak üzere 3 nüsha olarak word formatında sunulmalıdır. Her başvuru bir **kapak yazısı** (iletişimde bulunulacak yazar bilgileri belirtilerek) ile yapılmalıdır. Çalışma herhangi bir kurumun desteği ile gerçekleşmiş ise, çalışmayı destekleyen kurumun adı ilk sayfa altına dipnot şeklinde yazılmalıdır.

**1. Eserin bölümleri/Divisions:** Şu sıraya uygun olmalıdır: Başlık, Özet, Anahtar kelimeler, Title, Abstract, Keyword; 1. Giriş, 2. Materyal ve Metot, 3. Sonuçlar 4. Tartışma, 5. Teşekkür (Gerekliyse), 6. Kaynaklar (basılmamış eslere atıf verilmemelidir).

**2. Kapak Sayfası/First Page:** Başlıklar çalışmayı ve çalışmanın amacını tanımlayıcı şekilde kısa ve açık olmalıdır. **(Türkçe Başlık Ortalı 12 Punto, İngilizce Başlık Ortalı 11 Punto Olarak Verdane Fontu ile Kalın (Bold) Kelimelerin ilk Harfleri Büyük Olarak Yazılmalıdır.** (Semboller ve kısaltmalar için küçük harfler kullanılabilir). Başlığın altına, eserin yazar yada yazarlarının adı-soyadı ile posta ve sorumlu yazarın e-mail adresleri yazılmalıdır.

**3. Özet/Abstract:** Özet 200 kelimeyi geçmeyecek şekilde Türkçe ve İngilizce yazılmalıdır. İngilizce özetin başına

eserin başlığı aynı dilden yazılmalıdır. Özetlerin sonunda anahtar kelimeler yer almalıdır.

**4. Metin/Text:** Genel olarak Giriş, Materyal ve Yöntem, Bulgular ve Sonuca ilişkin kısımları kapsar. **Tüm başlıklar Bold, kelimelerin ilk harfleri büyük yazılmalıdır.**

**5. Semboller/Symbols:** Metin içinde kullanılan sembollerin tamamı bu başlık altında verilir. Gerektiğinde "Yunan Harfleri", "Alt İndis" gibi alt başlıklar kullanılabilir.

**6. Kaynaklar/References:** Metinde parantez içerisindeki [1], [2] vb. rakamlarla numaralandırılmalı (Örnek 1: Bölücek ve diğ. [1] tarafından ..... , Örnek 2: Çakır ve Aşkın [5] Baskıl dolayları ..... Örnek 3: .....taksonomide kullanılmaktadır [6, 8-12]) ve metin sonunda da eser içinde veriliş numara ve sırasına göre yazılmalıdır.

**Kaynaklarda literatürün verilmesi;**

**Makaleler**

**Örnek 1:** Yang, C.M., Chang I.F., Lin, S.J. and Chou, C.H. (2004). Effects of three allelopathic phenolics on chlorophyll accumulation of rice (*Oryza sativa*) seedlings: II. Stimulation of consumption-orientation. *Bot. Bull. Acad. Sin.*, **45**: 119-125.

**Örnek 2:** Turan, M. (1996). Şiran (Gümüşhane) doğu yöresinin tektonik özellikleri. Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü *30. Yıl Sempozyumu, (16-20 Ekim 1995) Bildirileri*, S. Korkmaz ve M. Akçay (Editörler), Trabzon, 275-292.

**Kitaplar**

**Örnek 3:** Tatar, Y. (1995). Jeolojik Harita Bilgisi. Fırat Üniversitesi Yayınları, No: 43, Elazığ, 297s.

**Kitaptan bir bölüm**

**Örnek 4:** Sarıtaş, S., Davies, T.J. (1987). "Reduction of Oxide Inclusions During Pre-Forging Heat Treatments" in Powder Metallurgy for Full Density Products, New Perspectives in Powder Metallurgy, Cilt 8, (Ed) Kulkarni, K.M., Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, A.B.D, 417-430.

**Tezler**

**Örnek 5:** Bilhan, Ö. (2005). Labirent savakların hidrolik karakteristiklerinin deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 64s.

**7. Tablo ve Şekiller/Tables and Figures:** Tablo içermeyen bütün görüntüler (fotoğraf, çizim, diyagram, grafik, harita vs.) şekil olarak isimlendirilmelidir. Her bir Tablo ve Şekil metin içindeki sıralanmasına göre numaralandırılmalıdır. Tablo başlıkları tablonun üstüne, şekil başlıkları şeklin altına konulmalıdır. Tablo başlıkları tablonun üst satırında tablo içerisine yerleştirilmelidir ve Tablo yazısının yerleştirildiği bu kısımdaki tablo çizgileri çıktıda görünmez yapılmalıdır. Şekillerde asla el yazısı kullanılmamalı ve Tablolardaki yazılar hiç bir zaman 8 puntodan küçük olmamalıdır.

## YAYINA KABUL EDİLEN MAKALELERİN BASKI FORMATI

	Açıklama	Kontrol
<b>Genel</b>	Hakem değerlendirmesinden sonra yayına kabul edilen makaleler, yazarları tarafından baskı formatında yeniden düzenlenerek, 1 adet basılmış orijinal kopya ve bir cd ile editörlüğe gönderilir. Makalelerin basımı sırasında editörlüğün formatla ilgili uygulamaları dışında hiç bir dizgi işlemi yapılmayacaktır. Makaleler Office 2000 veya üstü ile yazılmalıdır. Metin, Times New Roman Türkçe karakteri ve tek satır aralığı kullanılmalıdır.	
<b>Sayfa Yapısı ve düzeni</b>	Makale başlığından Keywords' un sonuna kadar olan kısım tek sütun halinde düzenlenmelidir. Giriş'ten itibaren makale <b>7,68 cm</b> genişliğindeki <b>çift sütun</b> halinde yerleştirilmelidir (sütunlar arası boşluk <b>0,64 cm</b> ). Sayfa düzenlemede, üst <b>35</b> , sol ve sağ <b>25 mm</b> ve alt <b>30 mm</b> olmalıdır. Üstbilgi ve altbilgi <b>2,5 cm</b> olmalıdır. Üstbilgi, tek ve çift sayfalarda farklı ve ilk sayfada farklı seçenekleri işaretlenmelidir. Üstbilgiler <b>8 punto</b> Times New Roman fontunda olmalıdır.	Lütfen sayfa yapısı ve düzenine dikkat ediniz.
<b>Türkçe Başlık</b>	Makale başlığı <b>Verdana</b> fontuyla <b>12 punto</b> , sadece baş harfleri büyük olacak şekilde, ortalı ve koyu (bold) olarak yazılmalı ve Türkçe başlıktan önce ve sonra <b>18 nk</b> (paragraf'tan) bırakılmalıdır.	
<b>Yazar Adları</b>	Yazar adları Times New Roman fontu ile ortalı, koyu ve <b>11 punto</b> olarak yazılmalıdır. Yazar adları ile adres arasında boşluk olmamalıdır.	
<b>Adresler</b>	Adresler Times New Roman fontu ile ortalı ve <b>10 punto</b> olarak yazılmalı. Sadece sorumlu yazarın e-posta adresi, adres satırlarının alt kısmına yine aynı font ve punto ile yazılmalıdır. (Geliş/Received: <b>**.**.200*</b> ; Kabul/Accepted: <b>**.**.200*</b> ) satırından önce <b>6 nk</b> ve sonra <b>12 nk</b> bırakılmalıdır. Adresin hemen alt satırında boşluk bırakmadan <b>10 punto</b> ile e-posta adresi yazılmalıdır.	
<b>Özet</b>	Özet'ten sonra <b>6 nk</b> boşluk bırakılmalıdır. "Özet" <b>10 punto</b> , koyu olarak yazılmalı, baş harfi büyük ve ilk satırın başında yazılmalıdır. Özet metni <b>10 punto</b> , tek paragraf olacak ve ilk satırda girinti yapılmayacak şekilde yazılmalıdır.	
<b>Anahtar Kelimeler</b>	Özet metninden sonra, <b>6 nk</b> boşluk bırakıldıktan sonra <b>9 punto</b> ile yazılmalı. En az <b>3</b> ve en çok <b>6</b> tane anahtar kelime baş harfleri büyük olacak şekilde yazılmalıdır. Anahtar kelimelerden sonra <b>12 nk</b> boşluk olmalıdır.	
<b>İngilizce Başlık</b>	Sadece baş harfleri büyük, ortalı ve koyu olarak <b>Verdana</b> fontu ile <b>11 punto</b> olarak yazılmalıdır. Keywords'den önce <b>6 nk</b> bırakılmalıdır.	
<b>Abstract</b>	"İngilizce başlıktan sonra <b>6 nk</b> boşluk bırakılmalıdır. "Abstract" <b>10 punto</b> , koyu olarak yazılmalı, baş harfi büyük ve ilk satırın başında yazılmalıdır. Abstract metni <b>10 punto</b> , tek paragraf olacak ve ilk satırda girinti yapılmayacak şekilde yazılmalıdır.	
<b>Keywords</b>	Abstract metninden sonra <b>6 nk boşluk</b> bırakıldıktan sonra <b>9 punto</b> ile yazılmalı. En az <b>3</b> ve en çok <b>6</b> tane anahtar kelime baş harfleri büyük olacak şekilde yazılmalıdır.	
<b>Başlıklar</b>	Başlıklar numaralandırılmalı, 1. derece başlıklarda tüm kelimelerin baş harfleri büyük, diğerlerinde ise sadece ilk kelimenin baş harfi büyük olmalı ve koyu olarak yazılmalıdır. Başlıklardan önce ve sonra bir boşluk bırakılmalı. Başlıklar sola dayalı olmalıdır.	
<b>Metin</b>	Metin, Keywords 'den sonra <b>12 nk</b> boşluk bırakılarak <b>tek satır aralıklı 11 punto</b> ile yazılmalıdır. Paragraf girintisi <b>0.7 cm</b> olmalı ve paragraflar arası boşluk bırakılmamalıdır.	Lütfen paragraf girintisine dikkat ediniz.
<b>Tablo</b>	Her bir Tablo ve Şekil metin içindeki sıralanmasına göre numaralandırılmalıdır. Tablo başlıkları Tablonun üst satırında Tablo içerisine yerleştirilmeli ve bu çizgiler görünmez yapılmalı, Tablo ile arasında boşluk bırakılmamalı ve <b>10 punto</b> ile ortalı yazılmalıdır. " <b>Tablo 1.</b> " koyu yazılmalı, açıklaması sadece ilk kelimenin baş harfi büyük olmalı ve bold olmamalıdır. Tablo içerisindeki yazılar <b>9 punto</b> olmalıdır. Eğer gerekirse <b>8 punto</b> da olabilir.	
<b>Şekiller</b>	Şekillerin altına <b>10 punto</b> ortalı olmalıdır. " <b>Şekil 1.</b> " koyu yazılmalıdır. Şekil açıklamasından sonra bir boşluk bırakılmalıdır. Şekil yazısı koyu yazılmamalıdır.	
<b>Kaynaklar</b>	İlk sunum ile aynı olmalı ve <b>10 punto</b> ile yazılmalıdır. Lütfen bir önceki sayfaya bakınız. <b>Örnek:</b> 1. Narusawa, U. (1999). The second law analysis of mixed convection in rectangular duct. <i>Heat Mass Transfer</i> , <b>35</b> , 499-506.	Lütfen kaynakların yazım kurallarına dikkat ediniz.
<p><b>Not:</b> Makale çift sütuna dönüştürüldüğünde; özellikle sayfa numaraları ve alt ve üstbilgi verildiği zaman makalede tablolar, şekiller vb. değişmekte, karışıklık olabilmektedir. Çift sütun olmayacak kısımların üst satır sonu Ekle →Kesme→Sürekli seçilerek ayarlanabilir. Bu işlemi Şekil ve Tablodan önceki satırın sonunda, Şekil ve Tablodan sonraki satırın başında da yapmak gerekir. Kesme işlemini Kaynaklar yazısından önceki cümlelerin sonuna ve Kaynakların sonuna da yapmak gerekmektedir. Dosya→Sayfa yapısı→Düzen'den altbilgi ve üstbilgi 2,5 cm seçilmeli, tek ve çift sayfalarda farklı ve ilk sayfada farklı seçenekleri işaretlenmelidir.</p> <p>Makale dizgisinin doğruluğunu kontrol için, Ekle'den sayfa numaraları vererek her sayfaya doğru olarak numara verilip verilmediği kontrol edilmelidir. Aynı şekilde Görünüm'den ilk sayfada, tek sayfalarda ve çift sayfalarda üstbilgi verip doğruluğu web sitemizdeki örnekte yazılanlar yazılarak kontrol edilmelidir.</p>		



## Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

### Telif Hakkı Devir Formu / Copyright Form

Biz aşağıda gerekli bilgileri bulunan,

[Yazarların Adı / Author names]

.....

.....tarafımızdan yazılmış,

[Makale Adı / Article title]

.....

.....

başlıklı makale içeriği, sunduğu sonuç, bilgi, bulgu ve yorumları konusunda, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'nün hiç bir sorumluluk taşımadığını kabul ederiz.

Sunduğumuz makalenin orijinal olduğunu; herhangi bir başka dergiye yayınlanmak üzere gönderilmediğini; daha önce yayınlanmadığını; tümüyle yada bir bölümü herhangi bir kongre/sempozyum da sunulup fakat tam metin olarak basılmadığını ve orijinal telif hakkı devri formu ile birlikte Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'ne gönderildiğini garanti ederiz.

Makalenin telif hakkından feragat etmeyi kabul ederek sorumluluğu üstlenir ve imza ederiz. Bu vesileyle makalenin telif hakkı Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü' ne devredilmiştir. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü makalenin yayınlanabilmesi konusunda yetkili kılınmıştır. Bununla birlikte yazarların aşağıdaki hakları saklıdır:

Aşağıdaki ve diğer bütün durumlarda makalenin Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi tarafından yayımlandığına dair referans verilmelidir.

1. Telif Hakkı dışında kalan patent v.b. bütün tescil edilmiş haklar.
2. Makaleyi satmamak koşulu ile kendi amaçları için çoğaltma hakkı.
3. Yazarın gelecekteki kitaplar ve dersler gibi çalışmalarında; makalenin tümü ya da bir bölümünü ücret ödemeksizin kullanma hakkı.

**Bütün yazarlar tarafından imzalanması gerekiyor:** (Sorumlu yazar/Corresponding author\*)

Yazarın Adı ve Soyadı / Author Names

İmzası / Signature

Tarih / Date

1 .....

2 .....

3 .....

4 .....

5 .....

**NOT:** Eksik imza durumunda sorumluluk imzalayan yazarlara aittir. Lütfen formu doldurunuz, imzalayanız ve aşağıdaki adrese metinle birlikte gönderiniz.

Adres: Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Editörlüğü, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 23119-Elazığ.