

**MULTİDİSİPLİNER  
YAKLAŞIMLA GÜNCEL MÜHENDİSLİK  
PROBLEMLERİNİN ANALİZİ**

**EDİTÖR**  
**Doç. Dr. İsmail TOPCU**

**Prof. Dr. Muzaffer ZEREN**  
**Prof. Dr. Musa SARIKAYA**  
**Prof. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU**  
**Dr. Öğr. Üyesi Funda Gül KOÇ**  
**Dr. Öğr. Üyesi Begüm Yurdanur DAĞLI**  
**Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül YÜCEL**  
**Öğr. Gör. Ece SİMOOĞLU SARI**  
**Melike GÖLGELEYEN**  
**Serkan DUMAN**

**ISBN: 978-625-6181-71-7**

**Ankara -2024**

# MULTİDİSİPLİNER YAKLAŞIMLA GÜNCEL MÜHENDİSLİK PROBLEMLERİNİN ANALİZİ

## EDİTÖR

Doç. Dr. İsmail TOPCU  
ORCID ID:0000-0002-2998-6569

## YAZARLAR

Prof. Dr. Muzaffer ZEREN<sup>1</sup>

Prof. Dr. Musa SARIKAYA<sup>2</sup>

Prof. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU<sup>3</sup>

Dr. Öğr. Üyesi Funda Gül KOÇ<sup>4</sup>

Dr. Öğr. Üyesi Begüm Yurdanur DAĞLI<sup>5</sup>

Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül YÜCEL<sup>6</sup>

Öğr. Gör. Ece SİMOOĞLU SARI<sup>7</sup>

Melike GÖLGELEYEN<sup>8</sup>

Serkan DUMAN<sup>9</sup>

<sup>1</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme  
Mühendisliği, Kocaeli, Türkiye, zeren@kocaeli.edu.tr  
ORCID ID: 0000-0001-5490-3799

<sup>2</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü,  
Malatya, Türkiye, musa.sarikaya@inonu.edu.tr  
ORCID ID:0000-0003-4942-4472

<sup>3</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme  
Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye, ryamanoglu@kocaeli.edu.tr  
ORCID ID:0000-0002-4661-8215

<sup>4</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme  
Mühendisliği, Kocaeli, Türkiye, funda.demircan@kocaeli.edu.tr  
ORCID ID:0000-0001-6517-1239

<sup>5</sup>Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa Teknik Bilimler Meslek  
Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 45140, Manisa, Türkiye,  
begum.dagli@bayar.edu.tr  
ORCID ID:0000-0002-2021-5450

<sup>6</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun MYO, Çevre Koruma ve  
Kontrol Böl., Hatay, Türkiye, aysegul.yucel@iste.edu.tr  
ORCID ID:0000-0001-7069-7518

<sup>7</sup>Kocaeli Üniversitesi, Hereke Asım Kocabıyık MYO, Makine ve Metal  
Teknolojileri, Metalurji Programı, Kocaeli, Türkiye,  
ece.simooglu@kocaeli.edu.tr  
ORCID ID:0000-0001-5307-9654

<sup>8</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme  
Mühendisliği, Kocaeli, Türkiye, melikegolgeleyen93@gmail.com

<sup>9</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü,  
Malatya, Türkiye, mdnserkanduman@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14444880>



Copyright © 2024 by UBAK publishing house  
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or  
transmitted in any form or by  
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical  
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of  
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses  
permitted by copyright law. UBAK International Academy of Sciences Association  
Publishing House®  
(The Licence Number of Publicator: 2018/42945)

E mail: [ubakyayinevi@gmail.com](mailto:ubakyayinevi@gmail.com)

[www.ubakyayinevi.org](http://www.ubakyayinevi.org)

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.  
UBAK Publishing House – 2024©

**ISBN: 978-625-6181-71-7**

December / 2024

Ankara / Turkey

## ÖNSÖZ

Tarihsel olarak değişen ve gelişen yaşam alanlarında ortaya çıkan ve çıkabilecek problemlerin çözümüne yönelik farklı uzmanlık alanlarında yapılan akademik çalışmalar geniş ölçüde önen kazanmaktadır. Çözüm odaklı multidisipliner çalışmalara devam edilmektedir. Karşılaşılan ve geçmişten gelen köklü problemlerin çözümü de disiplinler arası yapılan çalışmalar ile daha farklı bakış açısı sağlamaktadır. Bu nedenle farklı disiplinleri bir araya getirilmesi oldukça önemlidir. Bu kitap özellikle lisansüstü eğitimlerde dünyada ve özellikle ülkemizde çalışan bilim insanları ve eğitim alan öğrencilerin, gelişimine katkıda bulunması amacıyla hazırlanmıştır. Kitabın içeriğinde günümüzde problemlerinin çözümüne dönük güncel ve çok önemli farklı mühendislik bilimlerinde çalışan bilim insanlarının araştırmaları bir arada sunulmuştur. Yapılan çalışmalar içerik olarak konular itibari ile hem teorik hem de uygulamalı alanlar ele alınarak konu esasları açıklanarak verilmiştir. Birinci bölümde ise Metalurji ve Malzeme mühendisliğinde alanında Plastik kalıp çeliğinde borlama süresinin FeB ve Fe<sub>2</sub>B katmanlarının morfolojisine etkisi ele alınmıştır. İkinci bölümde Maden Mühendisliğinde alüminyum üretimi esnasında ortaya çıkan ve endüstriyel bir atık olarak değerlendirilen kırmızı çamurun farklı bir çevresel soruna potansiyel bir çözüm olması için, Kırmızı çamurun malahit yeşili boyasının gideriminde kullanılması araştırılmıştır. Üçüncü ve dördüncü bölümlerde Metalurji ve Malzeme mühendisliğinde toz metalurjisi alanında farklı yöntemle sinterleme ve karakterizasyon konuları, Basınç destekli sinterleme tekniklerinde

mikroyapıya genel bakış ve Toz metalurjisinde partikül morfoloji karakterizasyonunun önemi çalışılmıştır. Son olarak beşinci bölümde teknik bilimler alanında son dönemlerde enerji nakil hatlarında kullanılan araştırılması elzem ve çok güncel Denizaltı boru hatlarının geniş çap, kalınlık aralığında dinamik davranış parametrelerinin tahmini incelenmiştir. Kitabın hazırlanmasında emeği geçen herkese ayrıca yayınevine teşekkür eder, bu kitaptan faydalanacak araştırmacılara başarılar dilerim.

**Doç. Dr. İsmail TOPCU**



## **İÇİNDEKİLER**

ÖNSÖZ.....iv

### **BÖLÜM 1**

**PLASTİK KALIP ÇELİĞİNDE BORLAMA SÜRESİNİN FeB ve Fe2B KATMANLARININ MORFOLOJİSİNE ETKİSİ.....(1-14)**

Dr. Üyesi Funda Gül KOÇ

Öğr. Gör. Ece SİMOOĞLU SARI

Melike GÖLGELEYEN

Prof. Dr. Muzaffer ZEREN

### **BÖLÜM 2**

**KIRMIZI ÇAMURUN MALAHİT YEŞİLİ BOYASININ GİDERİMİNDE KULLANILMASININ ARAŞTIRILMASI.....(15-49)**

Serkan DUMAN

Prof. Dr. Musa SARIKAYA

Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül YÜCEL

### **BÖLÜM 3**

**BASINÇ DESTEKLİ SİNTERLEME TEKNİKLERİNDE MİKROYAPIYA GENEL BİR BAKIŞ.....(50-61)**

Prof. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU



## **BÖLÜM 4**

### **TOZ METALURJİSİNDE PARTİKÜL MORFOLOJİ**

#### **KARAKTERİZASYONUNUN**

**ÖNEMİ.....(62-75)**

Prof. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU

## **BÖLÜM 5**

### **DENİZALTI BORU HATLARININ GENİŞ ÇAP, KALINLIK**

#### **ARALIĞINDA DİNAMİK DAVRANIŞ PARAMETRELERİNİN**

**TAHMİNİ.....(76-103)**

Dr. Öğr. Üyesi Begüm Yurdanur DAĞLI

## **BÖLÜM 1**

### **PLASTİK KALIP ÇELİĞİNDE BORLAMA SÜRESİNİN FeB ve Fe<sub>2</sub>B KATMANLARININ MORFOLOJİSİNE ETKİSİ**

Dr. Öğr. Üyesi Funda Gül KOÇ

Öğr. Gör. Ece SİMOOĞLU SARI

Melike GÖLGELEYEN

Prof. Dr. Muzaffer ZEREN

### **GİRİŞ**

Borlama işlemi termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Metal parçaların yüzeylerini sertleştirmek için kullanılan işlem. Bu termokimyasal işlem hem demir esaslı hem de demirdışı metal ve alaşımlarına uygulanabilir. Bu işlemde termodifüzyonla bir borür tabakası oluşturulur. Ortaya çıkan metalik borür tabakası yüksek sertlikte, tribolojik özellikleri iyi, orta yüksek sıcaklıkta yüksek oksidasyon direncine sahip bir yüzey sağlar. Demir esaslı alaşımlarındaki borür katmanlarının morfolojisi matriste bulunan alaşım elementlerine bağlıdır. Borlama teknikleri arasında toz paket borlama basitliği, maliyet etkinliği ve kolaylığı nedeniyle en yaygın kullanılanıdır. Borlama işlemi; kimya endüstrisi, tarım, makine sanayi ve demiryolu taşımacılığı, tekstil gibi endüstriyel sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Borür tabakasındaki FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının varlığı, borlanmış çelikler önemli bir rol oynar. Borlama işleminde toz karışımının kimyasal bileşimine bağlı olarak, tek bir borür tabakasının

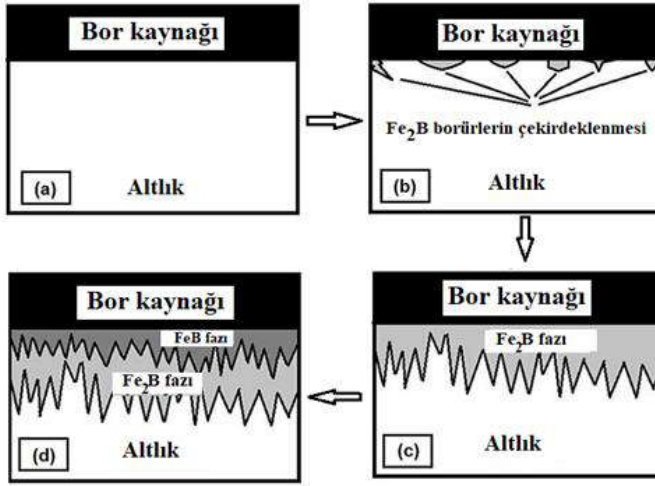
(Fe<sub>2</sub>B) elde edilmesi mümkün olduğu gibi, çift borür tabakasının da (FeB+Fe<sub>2</sub>B) elde edilmesi de mümkündür (Ortiz-Domínguez, M. ve ark., 2019; Abdullah, B. ve ark., 2022).

Bor'un küçük boyutlu bir atom olması; demir, karbon çeliği gibi malzemelerdeki difüzyon yeteneğinde çok önemli bir rol oynar (Sen, S. ve ark., 2005). Bor atomların küçük boyutları ve yüksek sıcaklıklardaki yüksek hareketlilikleri nedeniyle metal yüzeyde hızla yayılır. Borlama işlemi sonrasında son derece sert bir borür tabakaları oluşur (Stewart, K., 1997; Milinović, A. ve ark., 2012). Borlama işlemi, metalik yüzey üzerinde bir çekirdeklenme süreci ve katman oluşumu için bir difüzyon sürecini içerir. Borlama en çok karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler için uygundur ve tipik olarak: 800 ila 1050°C arasında değişen sıcaklık koşullarında ve 1-12 saat süre koşullar altında gerçekleştirilir (Dossett, J. ve Totten, G. E., 2013; Mebarek, B. ve Keddam, M., 2018).

Karbon çeliğine borlama uygulandığında oluşan katmanlar testere dişi benzeri bir morfolojiye sahiptir. Oluşan katmanlar bir demir borür fazı (Fe<sub>2</sub>B) içerebilir veya bir çift faza (FeB + Fe<sub>2</sub>B) sahip olabilir. Tipik olarak FeB, Fe<sub>2</sub>B'den daha serttir. Uygun bir Fe<sub>2</sub>B tabakasını oluşturmak, çekirdeklenme sonrası büyümenin devamını sağlamak için sürekli bir bor akışına ihtiyaç vardır. Fe<sub>2</sub>B borür dış yüzeyde çekirdeklenir ve altlığın iç kısmına doğru ilerler. Bor akışımın difüzyon bariyerini geçmesi gerekir.

Çift fazlı borür tabakalarını oluşumu Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. İlk olarak altlık malzeme ile bor ile temas ettikten sonra Fe<sub>2</sub>B çekirdeklenmesi başlar. Fe ve B atomlarının sürekli varlığı sürekli Fe<sub>2</sub>B tabakası oluşumu için gereklidir. FeB'nin çekirdeklenmesi ve

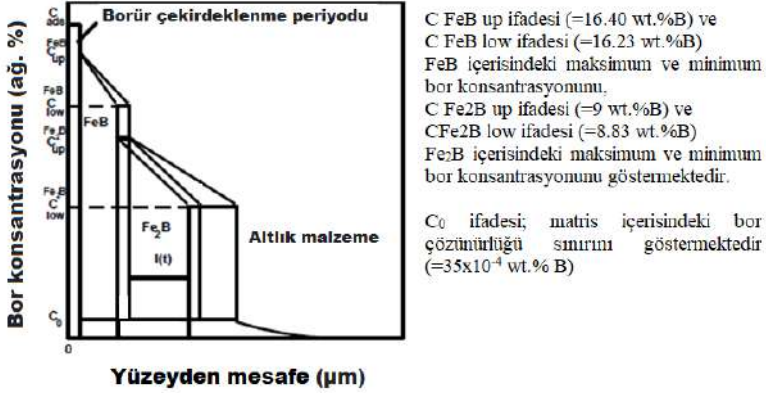
büyümesi için nispeten daha uzun sürelerle ve yüksek sıcaklıklarda ihtiyaç duyması, FeB'in neden borlama işlemine tabi tutulan karbon çeliklerinin dış katmanında bulunduğunu açıklar. Bu nedenle borür tabakalarının kalınlığı ve kalitesi; altlık malzemenin kimyasal bileşimine, bor kaynağının türüne, borlama işlem sıcaklığına ve işlem süresine bağlıdır (Velázquez-Altamirano, J. C. ve ark., 2019).



**Şekil 1.** Borür tabakalarının oluşumunun şematik gösterimi; (a) prosesin başlangıç durumu, (b) demir borürlerin çekirdeklenmesinin başladığı ikinci aşama, (c) Fe<sub>2</sub>B fazının konsolide edildiği üçüncü aşama ve (d) FeB fazının malzemenin yüzeyinde oluştuğu sürecin son aşaması (Velázquez-Altamirano, J. C. ve ark., 2019)

Borür tabakalarının morfolojisi, büyümesi, tabaka kalınlığı ve faz bileşimi, alt tabakada bulunan malzemenin alaşım elementlerinden etkilenir (Goeriot, P. ve ark., 1981). Sade karbonlu çeliklerde borun [001] yönünde tarak-testere benzeri borür tabakaları elde edilir. Çelik üzerindeki borür tabakası çok yüksek bir yüzey sertliği göstermesine rağmen, mikrosertlikte farklılık gösterir (Prince, M. ve ark., 2018).

Şekil 2’de verilen kinetik modelden yararlanılarak FeB ve Fe<sub>2</sub>B katmanlarının kalınlıkları yaklaşık olarak belirlenebilmektedir. Model, uzun bir borür çekirdeklenme sürecinden sonra bor atomları ile doymuş bir matris içerisinde Fe<sub>2</sub>B katmanının oluşmaya başlayacağını öngörmektedir (Keddam, M. ve Jurçi, P., 2021).



Şekil 2. Bor konsantrasyonuna bağlı olarak, malzeme yüzeyinden itibaren oluşan çift fazlı borür tabakası (FeB + Fe<sub>2</sub>B) oluşumunun şematik gösterimi (Keddam, M. ve Jurçi, P., 2021).

## 1. MALZEME VE YÖNTEM

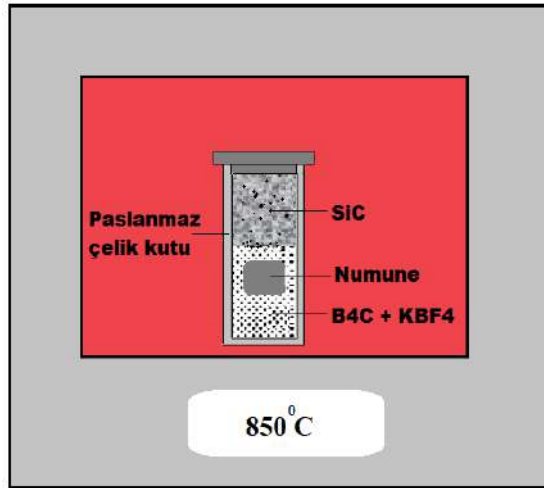
Bu çalışma kapsamında düşük karbonlu plastik iş takım çeliğine yapılan katı borlama işlemi sonrasında oluşan borür tabakasının morfolojisi ile çeliğin sertliğine etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan ve kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilen plastik kalıp çeliklerine 850°C sıcaklıkta 4 saat ve 12 saat süreyle iki farklı borlama işlemi yapılmıştır. Borlama işlemi uygulanan toz karışımlarının oranları ve kullanım amaçları Tablo 2’de, kutu borlama deney düzeneği Şekil 3’te verilmiştir.

**Tablo 1.** Deneysel çalışmada kullanılan kalıp çeliğinin kimyasal kompozisyonu (% ağı.)

<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>
0.1	3.0	2.5	1.0	0.3	0.3	Kalan

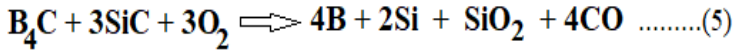
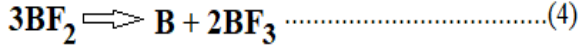
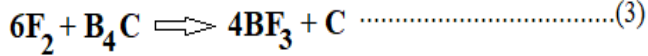
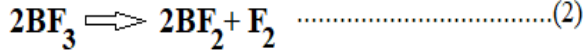
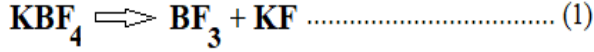
**Tablo 2.** Borlama için belirlenen toz karışım oranları

<b>Karışım Tozları</b>	<b>% (Ağı.)</b>	<b>Kullanım Amacı</b>
<b>KBF<sub>4</sub></b>	25	Aktivatör olarak
<b>B<sub>4</sub>C</b>	25	Bor kaynağı olarak
<b>SiC</b>	50	Deoksidan olarak



**Şekil 3.** Çalışmada kullanılan kutu borlama deney düzeneği

Deneysel çalışmada kullanılan bor kaynağı, aktivatör ve deoksidan tozlar arasında gerçekleşen ve çeliğin katı borlama sürecini oluşturan reaksiyonlar aşağıda verilmiştir (Ersöz, A., 2008).



## 2. BULGULAR VE TARTIŞMA

850 °C’de 4 ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerde mikroaypıasal incelemeler için kesit alınarak sırasıyla zımparaparlama ve dağlama aşamalarından oluşan metalografi işlemi uygulanmıştır. Borlama süresinin borlama tabakasına etkisini incelemek amacıyla numunelerde dağlanmış konumda elektron mikroskobu (SEM) ile farklı kontrast mekanizmaları kullanılarak mikroyapısal incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4 ve Şekil 5’de verilen tarama elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilen mikroyapısal karakterizasyon çalışmalardan çelik üst yüzeyinden itibaren tarak-testere benzeri bir morfolojide oluşan FeB ve Fe<sub>2</sub>B borür tabakalarının oluşumu katmanlar arası kontrast farkından ayırt edilebilmektedir.

Borlama tabakasında üst kısımda daha koyu gri renkte, FeB içeren bir borür tabakası, bu tabakanın hemen altında daha açık gri

renkte, Fe<sub>2</sub>B ile temsil edilen, daha kalın ikinci bir tabakanın olduğu görülmektedir.

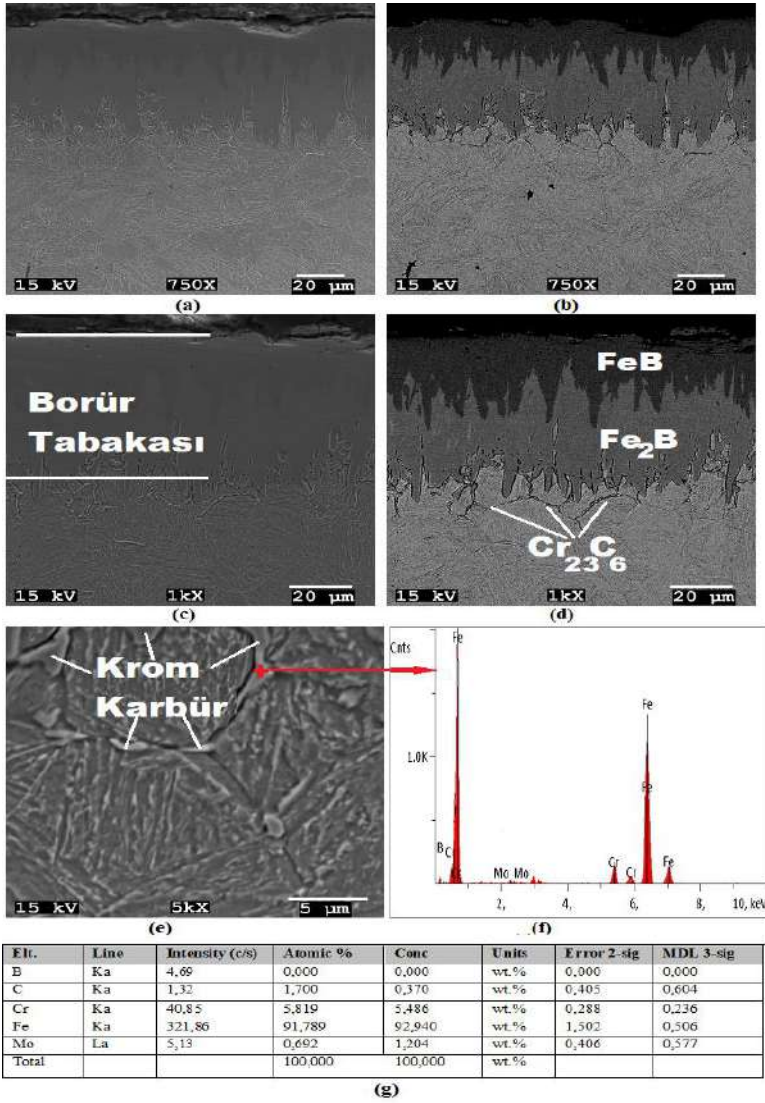
Ayrıca borlama tabakaları ile altlık malzeme arasındaki geçiş (difüzyon) bölgesinin varlığı da açıkça görülebilmektedir. Artan borlama süresine bağlı olarak borlama tabaka kalınlığının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca borür tabakaları arasında ve geçiş bölgesinde termal gerilmelere bağlı bir çatlak, tabakalar arası açılma vb. olumsuzluklara mikroyapı incelemelerinde rastlanmamıştır.

Şekil 4(e) ve Şekil 5(e)'deki SEM görüntülerinden, geçiş (difüzyon) bölgesindeki tane sınırlarında bazı çökeltilerin varlığı da tespit edilmiştir. SEM'de EDX analizi ile bu çökeltilerin krom karbür olduğu anlaşılmıştır.

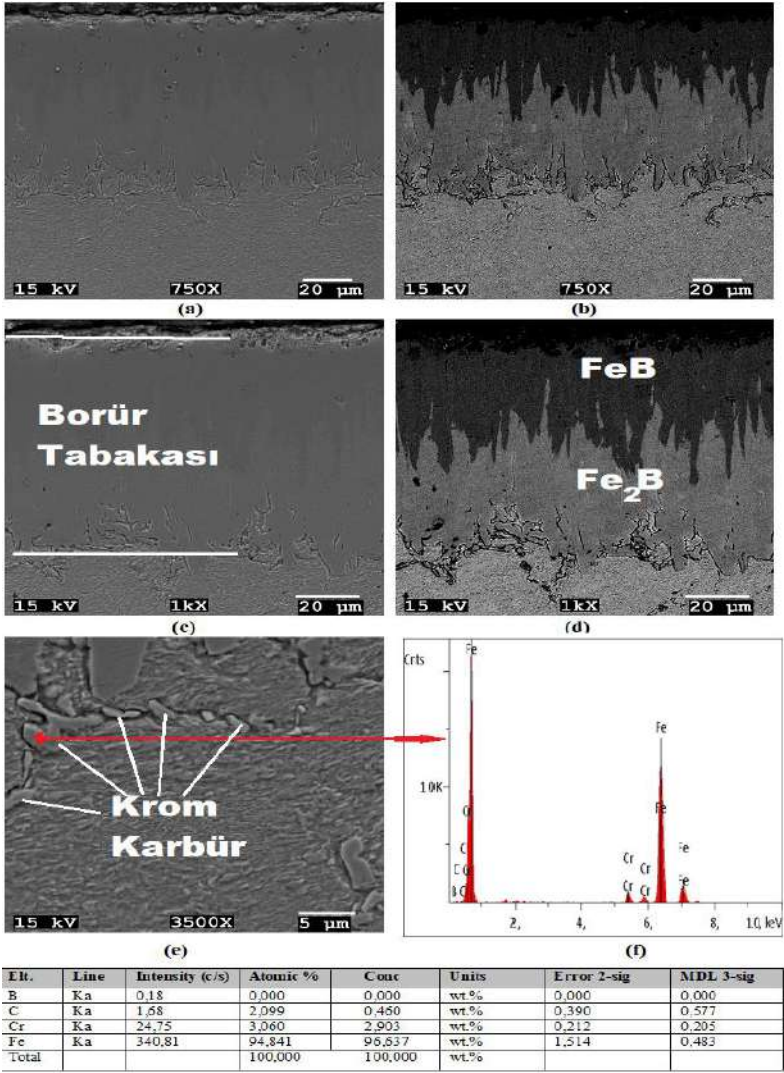
Krom karbürlerin, borür tabakaları ile altlık çelik malzeme ana yapısı arayüzeyine yakın, geçiş bölgesi içerisinde tane sınırlarında çökeldiği tespit edilmiştir. Bilindiği gibi, çeliklerde en yaygın olarak kullanılan alaşım elementlerinden biri kromdur.

Krom çelikte, oksidasyona ve korozyona karşı dayanımı ve bunun yanısıra aşınma direncini ve sertleşebilirliğini artırır. Krom kuvvetli bir karbür yapıcı olup, çeliklerde Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (Ortorombik), Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> (Hekzagonal) ve Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (YMK) türde sert karbürler oluşturarak sertliğin artmasını sağlar. Bunun yanısıra dönüşüm hızlarını da yavaşlatarak sertlik derinliğini de aynı oranda artırır (Krauss, G., 2015).





**Şekil 4.** 850°C’de 4 saat borlama yapılmış çelik malzemenin dağlanmış konum SEM görüntüleri ve EDX analizi, a,c,e) Topografik kontrast görüntüleri, b,d) Materyal kontrast görüntüleri, f,g) EDX analizleri

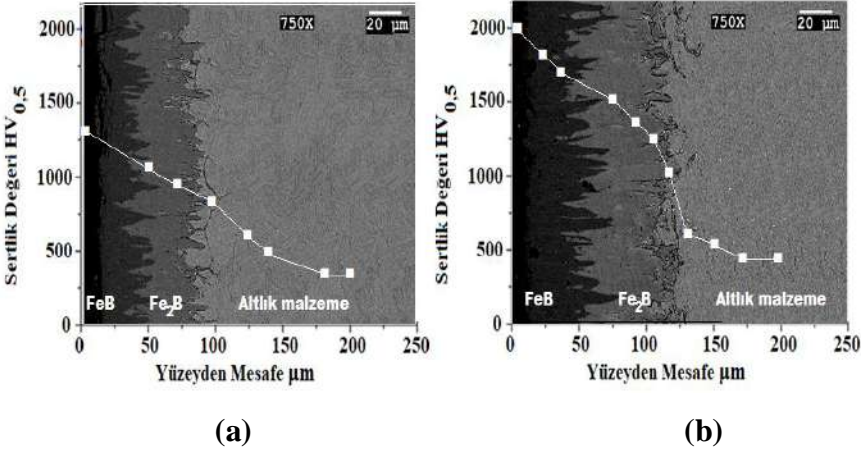


(g)

Şekil 5. 850°C'de 12 saat borlama yapılmış çelik malzemenin dağlanmış konum SEM görüntüleri ve EDX analizi, a,c,e) Topografik kontrast görüntüleri, b,d) Materyal kontrast görüntüleri, f,g) EDX analizleri

Farklı sürelerde gerçekleştirilen borlama işleminden sonra oluşan borlama tabaka kalınlığındaki farklılık ve buna bağlı sertlik profilindeki

değişimi incelemek amacıyla numune kesitlerinde yüzeyden merkeze doğru 0,5 kg yük altında mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Numunelere ait sertlik profilleri Şekil 6’da verilmiştir. Borlama süresinin numune yüzey sertliği ve sertlik derinliği üzerinde önemli etkiye sahip olduğu Şekil 6’da açıkça görülmektedir.



**Şekil 6.** Borlama süresinin borlama tabakası ve sertlik derinliğine etkisi  
a) 850°C 4 saat borlanmış, b) 850 °C 12 saat borlanmış

### 3. SONUÇLAR

Kalıp çeliğinde 850 °C 4 ve 12 saat süre ile gerçekleştirilen borlama işlemi sonrasında her iki durumda da oluşan borlama tabakalarının bor difüzyonu nedeniyle tarak-testere dişi benzeri bir morfolojiye sahip olduğu ve yüzeyden merkeze doğru ikisi borür tabakası olmak üzere ve bir geçiş bölgesiyle birlikte, birbirinden kontrast olarak ayırt edilebilen, üç farklı bölgenin meydana geldiği gözlemlenmiş olup, 850 °C’de 12 saat borlama işlemi sonrasında, 850 °C 4 saat borlama işlemine göre;

- FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakalarının daha kalın olduğu,
- FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakalarının daha sert olduğu,
- Yüzeyden itibaren toplam borür tabakasının daha kalın ve daha sert olduğu,
- Tabakalardan altlık matris yapısına geçiş bölgesinin daha derinde ve daha sert olduğu,
- Sertlik derinliğinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

## KAYNAKÇA

- Ortiz-Domínguez, M., Keddám, M., Elias-Espinosa, M., Ramírez-Cardona, M., Arenas-Flores, A., Zuno-Silva, J., ... & Cardoso-Legorreta, E. (2019). Characterization and boriding kinetics of AISI T1 steel. *Metallurgical Research & Technology*, 116(1), 102.
- Abdullah, B., Alias, S. K., Ab Latif, M. N. H., Ahmad, N., Sulaiman, S. A., & Rahmat, S. N. (2022). Morphological behavior of FeB and Fe<sub>2</sub>B in boride layer of 304 stainless steel under different medium. *Jurnal Teknologi*, 84(3), 143-150.
- Sen, S., Sen, U., & Bindal, C. (2005). An approach to kinetic study of borided steels. *Surface and Coatings Technology*, 191(2-3), 274-285.
- Stewart, K. (1997). Boronizing: protects metals against wear. *Advanced Materials & Processes*, 151(3), 23-26.
- Milinović, A., Krumes, D., & Marković, R. (2012). An investigation of boride layers growth kinetics on carbon steels. *Tehnicki vjesnik/Technical Gazette*, 19(1).
- Dossett, J., & Totten, G. E. (2013). *ASM handbook. volume 4A, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes*, ASM.
- Mebarek, B., & Keddám, M. (2018). A fuzzy neural network approach for modeling the growth kinetics of FeB and Fe<sub>2</sub>B layers during the boronizing process. *Matériaux & Techniques*, 106(6), 603.
- Goeriot, P., Thevenot, F., & Driver, J. H. (1981). Surface treatment of steels: Borudif, a new boriding process. *Thin Solid Films*, 78(1), 67-76.

- Prince, M., Arjun, S. L., Raj, G. S., & Gopalakrishnan, P. (2018). Experimental investigations on the effects of multicomponent laser boriding on steels. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 25276-25284.
- Velázquez-Altamirano, J. C., Torres-Avila, I. P., Teran-Méndez, G., Capula-Colindres, S. I., Cabrera-Sierra, R., Carrera-Espinoza, R., & Hernández-Sánchez, E. (2019). A stochastic model and investigation into the probability distribution of the thickness of boride layers formed on low-carbon steel. *Coatings*, 9(11), 756.
- Keddam, M., & Jurči, P. (2021). Simulating the growth of dual-phase boride layer on AISI M2 steel by two kinetic approaches. *Coatings*, 11(4), 433.
- Ersöz, A. (2008). Elektrokimyasal borlama ile çeliklerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Krauss, G. (2015). *Steels: processing, structure, and performance*. Asm International.



## **BÖLÜM 2**

### **KIRMIZI ÇAMURUN MALAHİT YEŞİLİ BOYASININ GİDERİMİNDE KULLANILMASININ ARAŞTIRILMASI**

Serkan DUMAN

Prof. Dr. Musa SARIKAYA

Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül YÜCEL

## **GİRİŞ**

İnsanoğlunun yaşam şartlarını iyileştirme çabası gelişen teknoloji ile birlikte endüstride de hızlı gelişimi beraberinde getirmiştir. Endüstrideki bu gelişme ekonomik ve sosyal alanlarda fayda sağlarken diğer taraftan çevresel problemlerin de ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu problemlerin başında ise özellikle su kaynaklarının kirlenmesi gelmektedir.

Birçok endüstriyel alana hammadde temin eden madencilik faaliyetleri ısıl ve/veya kimyasal uygulamalar sonunda atıklar oluşturmaktadır. Oluşan bu atıkların farklı sektörlerde dolgu maddesi ya da hammadde olarak kullanılması söz konusudur. Madencilik faaliyetleri sonrasında depolanan katı maddelerin çökmesi sonucu meydana gelen su ise arıtma sistemleri ile yeniden sisteme beslenebilmektedir.

Bayer Prosesi kullanılarak boksit cevherinden alümina üretiminde kırmızı çamur olarak adlandırılan bir atık ürün oluşmaktadır. Kırmızı çamur oluşumunun dünya genelinde yaklaşık 3.5 milyar ton civarında olduğu ön görülmektedir (Kalsen, 2018). Bu endüstriyel katı atık



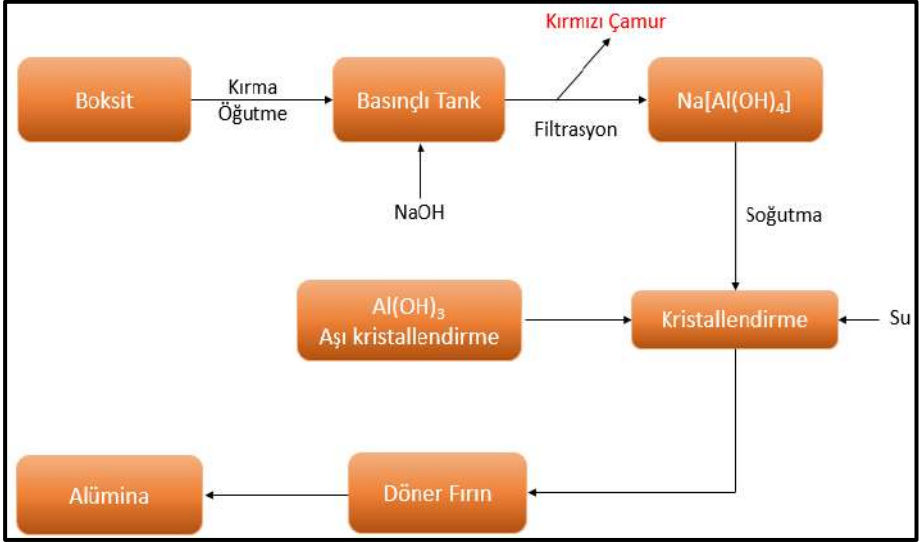
havuzlarda depolanmaktadır. Ancak kırmızı çamurun yüksek alkali içeriğinden kaynaklı oluşabilecek çevresel sorunlar nedeniyle ve sürdürülebilir bir endüstriyel faaliyetin olabilmesi amacıyla başka sektörlerde kullanılabilirliği araştırılmaya devam etmektedir.

Kırmızı çamur atığının boya gideriminde kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla yapılan bu çalışmada boyar madde olarak malahit yeşili kullanılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen veriler ve hesaplanan adsorpsiyon izotermi ile kırmızı çamurun malahit yeşili boyasının gideriminde kullanılabilir potansiyel bir adsorban olma olasılığı incelenmiştir.

## **1. Kırmızı Çamur Atığının Oluşumu**

Boksit cevherinden alümina kazanımı Bayer Prosesi yöntemiyle gerçekleşmektedir. Cevher kostik soda olarak adlandırılan NaOH yardımıyla yüksek sıcaklık ve basınçta çözündürülür. Bu süreç boksitin içeriğinde bulunan alüminanın ( $Al_2O_3$ ) likit faza geçmesi sonucuyla oluşum göstermektedir. Reaksiyonun tamamlanması çözelti halinde bulunan beyaz renkteki alüminyum hidroksit (hidrat,  $Al(OH)_3$ ) kristalizasyon (dekompozisyon) yöntemiyle çöktürülüp filtrasyon ile ayrılır. Oluşan hidratlı yapı fiziksel ve kimyasal suyun atılması amacıyla yüksek sıcaklıkta kalsine edilmesiyle alümina elde edilerek Bayer Prosesi tamamlanır (Arslan, 2016). Bu işlem basamakları arasında filtre edilerek alüminyum yüklü çözelti proseste devam ederken filtrede kek (Şekil 1.1) olarak alınan atık kırmızı çamur olarak atık havuzuna gönderilir. Kırmızı çamur elementel kompozisyon açısından titanyum ve demir oksitler ile sodyum alümina silikat yapılar

içeren bir atıktır (Kalsen, 2018; Özgün, 2012). Bu yöntem ile alümina üretimi esnasında 1000 kg alüminyum metali elde ederken 2000 kg kırmızı çamur atığı meydana gelmektedir (Varol, 2019).



**Şekil 1.1.** Bayer Prosesinde kırmızı çamurun alındığı aşamanın şematik görüntüsü (Çetinkaya, 2018)

Bir cevherin üretim ya da zenginleştirilme yönteminin belirlenmesi amacıyla başlıca yapılan analiz mineralojik analizdir. Bu analizde cevherin değerlendirilmesi cevher kaynağı ile ilgilidir. Bu nedenle boksit cevher kaynağına bağlı olarak kırmızı çamurunda kimyasal farklılıklar görülebilir. Anataz, kaolin, götit, kalsit, böhmit, hematit, kalsiyum ferrit yapılarının olduğu gibi magnezyum, potasyum ve vanadyum gibi metallerinde kırmızı çamurun yapısında olduğu bilinmektedir (Kaya, 2010). Ayrıca lantanit grubunu (Tm, Ce, Sm, Eu, Pm, La, Pr, Dy, Tb, Lu, Ho, Yb, Er, Nd, Gd) ve ekstrakte edilebilir konsantrasyonlarda La, Y, Sc, Ce gibi önemli nadir toprak elementleri

yer almaktadır (Kalsen, 2018; Krishnamurthy ve Gupta, 2015). Farklı ülkelerde bulunan alüminyum tesislerinde oluşan kırmızı çamur atığının kimyasal kompozisyonu Çizelge 1.1.'de verilmiştir.

**Çizelge 1.1.** Farklı bölgelerdeki kırmızı çamur atığının kimyasal kompozisyonu (Duman, 2022)

Ülke	Tesis	İçerik (Ağ. %)					
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO
Türkiye	Seydişehir	36,94	20,39	4,98	15,74	10,1	2,23
İtalya	Eurallumina	35,2	20	9,2	11,6	7,5	6,7
İngiltere	ALCAN	46	20	6	5	8	1
Fransa	Aluminum Pechiney	26,62	15	15,76	4,98	1,02	22,21
Kanada	ALCAN	31,6	20,61	6,23	8,89	10,26	1,66
Avustralya	AWAAK	28,5	24	3,11	18,8	3,4	5,26
Brezilya	Alunorte	45,6	15,1	4,29	15,6	7,5	1,16
Almanya	AOSG	44,8	16,2	12,33	5,4	4	5,22
İspanya	Alcoa	37,5	21,2	11,45	4,4	3,6	5,51
ABD	RMC	35,5	18,4	6,31	8,5	6,1	7,73

## 2. Kırmızı Çamur Depolanması ve Çevresel Sorunlar

Atık havuzlarında depolanan kırmızı çamur yüksek alkali içeriği nedeniyle gerekli önlemler alınmadığı takdirde bulunduğu çevreye olumsuz yönde etki edebilir. Örneğin pH seviyesi, kalsiyum, potasyum ve sodyum ölçümleri düzenli yapılarak bu depolama alanlarında sızıntı kontrolü yapılmalıdır. Ayrıca özellikle yaz aylarında yapısında bulunan suyun sıcaklıkla uzaklaşması sonucu toz haline gelen kırmızı çamur rüzgarın etkisiyle de çevreye yayılarak hava kirliliğini arttırarak canlı yaşamını olumsuz yönde etkileyebilir (Uzun, 2006). 2010 yılında

Macaristan Ajka bölgesinde bulunan kostik atık rezervuarında maddi zararı oldukça fazla olan kazada onlarca kişi hayatını kaybetmiştir (Ruyters ve diğ. 2011). Bu kazada rezervuar yaklaşık yüksekliği 22 metre ve genişliği 50 metre (Şekil 2.1.a) olacak şekilde yıkılmıştır. Kilometrelerce uzaklığa nehir gibi akmış, onlarca yerleşim yeri ve tarım arazisi zarar görmüştür (Şekil 2.1.a ve Şekil 2.1.b) Kırmızı çamur nötralizasyondan geçirilmeden depolanmıştır. Bu nedenle toksik olmazsa bile aşındırıcı özelliğe sahiptir (Katai ve Csepli, 2010). Bu nedenle atık rezervuarının etrafında bulunan toprak yapısı bozulmuş ve ekili toprakların agregalarının ise mavi-gri lekelerle rastlanmıştır. Meydana gelen kazanın çevresel zararları NASA tarafından sunulan uydu görüntüleri ile görülmektedir (Şekil 2.1).



**Şekil 2.1.** Macaristan'da meydana gelen kostik atık depolama alanı kazasının uydu görüntüsü

Kırmızı çamur birikimi yıllık ortalama yüz yirmi milyon ton civarında olduğu, toplamda birikmiş kırmızı çamur miktarının ise yaklaşık 2.7 milyar tonun üzerinde olduğu tahmin edilmektedir (Özgün, 2012). Bu kadar yüksek miktarda bir atığın depolama ve çevresel açıdan yüksek maliyet ve yüksek hassasiyet gerektirmektedir. Ayrıca atığın yeniden kullanımını amacıyla çeşitli sektörlerde kullanımı araştırılmaktadır.

### **3. Kırmızı Çamurun Değerlendirilmesi**

Alümina üretimi sırasında meydana gelen yaklaşık 1 ton kırmızı çamur atığının değerlendirilmesi konusunda çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. (Arslan, 2016; Akıncı, 2004). Kırmızı çamurun yapısında bulunan mikron düzeyindeki alkali partiküllerin çevresel etkenlerle yayılması canlılar için olumsuz bir etki oluşturmaktadır (Akıncı, 2004). Bu olumsuz etkinin azaltılması amacıyla susuzlandırma yaparak çevresel etkinin azaltılmaya çalışılsa da etkin bir yöntem değildir.

Çimento katkısı, yapay agrega, inşaat sektöründe, seramik yer karosunda pigment olarak, bazı ekilebilir alanlarda toprak ıslahında, karayollarında yatak malzemesi, radyoaktif atıkların bertaraf edilmesinde bunlara ilave olarak atık suların ve gazların arıtımında adsorban olarak kullanılmaktadır (Arslan, 2016).

Kırmızı çamurun demir kazanımı amacıyla kullanılması üzerine yapılan çalışmalar kapsamında, pik demirin elde edilmesi için sinterleme ve izabe işlemleri uygulanmıştır. İzabe sürecinde, cüruf yapısında bulunan alümina, toryum, uranyum, zirkonyum, sodyum oksit, titanyum dioksit, ve nadir toprak elementlerinin liç işlemleri ile kazanılması hedeflenmiş; klorlama, kristalizasyon, sıvı-sıvı ekstraksiyonu ve hidrolik çöktürme gibi yöntemler kullanılmıştır. Bu

cürufun liç atıkları, çimento ve gübre üretimi gibi değerlendirilmeye yönelik faaliyetlerde kullanılmıştır (Borra vd. 2015).

Kırmızı çamurun endüstriyel alanlarda değerlendirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmış; dolgu ve katalizör olarak, gaz temizleyici pasta üretiminde, fosforik cevherlerden mineral çamurların suyunun uzaklaştırılmasında, demir cevheri kazanımında ve suni mermer üretiminde kullanımı gibi farklı sektörlerde araştırmalar günümüzde de devam etmektedir. Ancak, kırmızı çamurdaki radyoaktif elementlerin yaydığı radyasyon nedeniyle, özellikle inşaat gibi alanlarda değerlendirme çalışmalarının sağlık sorunlarına yol açma riski bulunmaktadır ve bu yüzden bu alanlarda kullanımı sınırlı kalmıştır (Özgün, 2012).

Kırmızı çamur üzerinde yoğunlaşan bir diğer araştırma alanı ise, yapısında bulunan değerli metallerin geri kazanımıdır. Kırmızı çamur;  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $CaO$  ve  $Na_2O$  gibi bileşenler içermekte olup, Fe, Ti, Al, gibi değerli metallerin geri kazanımı için çalışmalar sürmektedir. Ayrıca, içeriğinde bulunan nadir toprak elementlerinden Sc, V, Nb, ve Th'nin geri kazanımı ile ilgili de araştırmalar yapılmaktadır (Özgün, 2012).

#### **4. Kırmızı Çamurun Adsorban Olarak Kullanılması**

Kırmızı çamurun boyar maddelerin giderimi üzerine yapılan literatür araştırmalarında birçok çalışma mevcuttur.

Namasivayam ve diğ. (2001), asit violet boyasının gideriminde 10 ppm ile 40 ppm arasındaki başlangıç boya konsantrasyonlarında kırmızı çamur kullanmışlardır. Langmuir izotermine göre, adsorpsiyon

kapasitesinin 1,37 mg/g olduğu tespit edilmiştir. Araştırmacılar, adsorpsiyon mekanizmasının iyon değişimlerinden kaynaklandığını ifade etmiş ve bu yöntemin boya giderimi için arıtma tesisi tasarımında faydalı olabileceği görüşünü belirtmişlerdir.

Namasivayam ve diğ. (2002), procion turuncusu boyası gideriminde farklı başlangıç boya konsantrasyonları ile karıştırma süresi, adsorban doz miktarı ve farklı pH seviyelerinde kırmızı çamurun etkinliğini incelemişlerdir. Adsorpsiyon ve desorpsiyon mekanizmaları araştırılmış, pH değerleri belirlenmiş ve pH 11'de maksimum %32 desorpsiyon gerçekleştiği bulunmuştur. Adsorpsiyon için Freundlich izoterm modellerinin uygun olduğu ve boyanın maksimum %82 oranında uzaklaştırılabildiği rapor edilmiştir.

Tor ve Çengeloğlu (2006), kongo kırmızısı boyasının gideriminde kırmızı çamur kullanarak yaptıkları çalışmada, adsorpsiyon dengesine 90 dakikada ulaşıldığını ve bu sürecin Langmuir, Freundlich ve Redlich–Peterson izotermlerine uygun olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonuçlar, kırmızı çamurun ekonomik bir adsorban olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Li ve diğ. (2017), kırmızı çamurdan sentezledikleri hiyerarşik gözenekli  $\gamma$ -AlOOH ve  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mikroküreleri ile yaptıkları çalışmada, bu mikrokürelere metilen mavisi gideriminde oldukça verimli bir adsorpsiyon sergilediğini bildirmişlerdir. Mikrokürelere metilen mavisi için maksimum adsorpsiyon kapasiteleri sırasıyla 953,0 mg/g ve 1587,6 mg/g olarak hesaplanmıştır.

Kazak ve diğ. (2017), kırmızı çamur ve sukroz kullanarak karbon küre kompozitler hazırlamışlar ve bu kompozitlerin metilen mavisi

gideriminde, kırmızı çamurun bileşenlerinden daha yüksek bir verime ulaştığını tespit etmişlerdir. Çalışmada, adsorpsiyon dengesine 60 dakika içinde ulaşıldığı, adsorpsiyon kapasitesinin ise 76,92 mg/g olduğu ve sürecin Langmuir izoterm modeline uygun olduğu rapor edilmiştir.

Akbıyık (2018), ozonla modifiye edilmiş kırmızı çamuru, İndigo Blue GLF boyar maddesinin gideriminde kullanmıştır. Yapılan çalışmalarda, 30 dakika temas süresinde 4 g/100 ml adsorban dozunu 5 ppm boyar madde için uygulandığında, ham kırmızı çamurdan %70,24 ve ozonla aktif edilmiş kırmızı çamurdan %80,99 giderim verimi elde edilmiştir. Babu ve diğ. (2019) da indigo karmin boyasının gideriminde kırmızı çamur kullanmışlardır. İndigo karmin boyasının giderim veriminin %94,0 olduğunu belirten çalışmada, Langmuir, Temkin, Freundlich, ve Dubinin-Radushkevich izoterm modelleri uygulanmıştır. Korelasyon katsayısının 0,9962 olması, Langmuir modeline uyum sağladığını ve 62,6 mg/g adsorpsiyon kapasitesini gösterdiği tespit edilmiştir.

Karpuz (2020), kırmızı çamur, kırmızı çamur katkılı sodyum aljinat bazlı mikroküre, montmorillonit, montmorillonit katkılı sodyum aljinat bazlı mikroküre ve sodyum aljinat mikroküre kullanarak malahit yeşili, çinko ve malahit yeşili-çinko karışımından boyar madde ve ağır metal giderimini incelemiştir. Çalışmada, kırmızı çamur katkılı sodyum aljinat bazlı mikroküre kullanıldığında, malahit yeşili, çinko ve malahit yeşili-çinko karışımı için maksimum adsorpsiyon verimleri sırasıyla %97,72, %99,88, %78,8 ve %88,2 olarak bulunmuştur. Sadece kırmızı çamur katkılı sodyum aljinat bazlı mikroküre için bu verimler sırasıyla %43,64, %71,6, %42,4 ve %50,64 olarak tespit edilmiştir.



Thakare ve diğ. (2020), asit ile aktive edilmiş kırmızı çamuru metilen mavisinin gideriminde kullanmışlardır. 10 ppm başlangıç boya konsantrasyonuna sahip çözeltide adsorpsiyon dengesi 75 dakikada sağlanmış ve %80 boya giderim verimine ulaşılmıştır.

Chegeni ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmada boksit ve kırmızı çamur ilave edilmiş kompozitler hazırlamışlardır. Fotokatalitik yöntem kullanılarak Rhodamin-B boya gideriminde bu kompozitleri araştırmışlardır. Fotokatalitik bozunmanın kırmızı çamur ilavesiyle boksitten daha etkili bir sonuç ortaya koyduğunu bildirmişlerdir.

Atun ve diğ. (2021) asitle aktive edilmiş boksit atık kırmızı çamurunun Nylomine-Blue ve Metilen-Blue için sorpsiyon özellikleri, sırasıyla anyonik-di-antrakınon ve katyonik-tiazin boyaları için potansiyel giderim mekanizması araştırılmıştır. Deneysel Nylomine-Blue sorpsiyon kapasitesi (0,020 mmol/g), 288 K'de Metilen-Blue'dan (0,012 mmol/g) daha yüksek olduğu ancak sıcaklıkla ters yönde değişerek sırasıyla 318 K'de 0,013 ve 0,043 mmol/g'a ulaştığı tespit edilmiştir.

Fang ve diğ. (2024) boya atık suyundan metilen mavisinin humik asit sakaroz modifiyeli kırmızı çamurla etkin adsorpsiyon performansını ve mekanizmasını araştırmışlardır. Kırmızı çamuru yüksek sıcaklıkta aktive etmiş ardından sükroz ve hümik asit ile birleştirerek bir kompozit malzeme hazırlamışlardır. Bu kompozit malzeme ile metilen mavisinin giderilmesi sağlanmıştır. Langmuir'in izotermal modeli ile elde edilen maksimum adsorpsiyon miktarının 417.12 mg/g, ayrıca simüle edilmiş endüstriyel atık su numunelerinin arıtımında RM-SC-HA kullanıldığında, giderim oranının da yüksek bir seviyede (yaklaşık %90) olduğunu bildirmişlerdir.

Li ve diğ. (2024) hidrotermal yöntem kullanılarak kırmızı çamur ve yemek atığı kompostu bir adsorban malzemeye dönüştürmüş ve metilen mavisi ve kongo kırmızısı boyalarının gideriminde kullanmışlardır. Bu malzemenin 298 K'de metilen mavisi için 124,06 mg/g ve kongo kırmızısı için 2959,35 mg/g'lik maksimum adsorpsiyon kapasitesine ulaştıklarını bildirmişlerdir.

Kırmızı çamurun adsorban malzemesi olarak başka bir çevresel sorun olan boya kirleticilerinin gideriminde hem doğrudan hem farklı yöntemlerle aktive edilmesiyle hem de farklı malzemelerle (yemek atığı kompostu, humik asit vs.) birleştirilerek kullanılması ile ilgili çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır.

## **5. Malzeme ve Yöntem**

### **5.1. Malzeme**

Adsorpsiyon deneylerinde kullanılan kırmızı çamur Eti Alüminyum A.Ş.'ye ait Seydişehir Alüminyum Tesisleri'nden temin edilen numuneden kullanılmıştır. Deneylerde malahit yeşili boyar madde olarak kullanılmıştır.

### **5.2. Yöntem**

Çalışmada, başlangıç boya konsantrasyonları olarak 100 ppm ve 200 ppm seçilmiş ve bu konsantrasyonların sıcaklık (25°C, 40°C ve 60°C) ile ilişkili olarak adsorpsiyon kapasitelerindeki değişimlerin incelenmesi amaçlanmıştır. Ön denemelerde, boya gideriminin 180 dakikada sabit kaldığı gözlemlenmiş ve deneylerde maksimum temas

süresi olarak bu süre belirlenmiştir. Belirlenen zaman aralıklarında (0 – 180 dakika) örnekler alınmıştır.

Hazırlanan 1000 mL çözeltiliye 1000 mg kırmızı çamur eklenerek deney gerçekleştirilmiştir. Alınan örnekler, belirlenen sürelerde 0,45 µm gözenek çapına sahip PTFE (politetrafloroetilen) şırınga ucu filtreden geçirilmiş ve tek kullanımlık küvetlere konulmuştur. Boya gideriminin takibi, Agilent marka Cary 60 model UV-Vis spektrofotometre ile yapılmıştır.

Elde edilen verilerle adsorpsiyon hızı ve mekanizması hakkında bilgi sağlamak amacıyla kinetik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Langmuir ve Freundlich modelleri kullanılarak adsorpsiyon izotermi incelenmiş, bu modellerle yüzey özelliklerine bağlı olarak adsorbanın davranışı ve adsorpsiyon sistemi hakkında bilgi edinilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, adsorpsiyon mekanizması yalancı birinci ve ikinci dereceden kinetik modeller ile araştırılmıştır.

Kırmızı çamurun karakterizasyonu, adsorpsiyon öncesi ve sonrası yapısal özelliklerindeki değişiklikler XRF, XRD, SEM ve FT-IR teknikleri kullanılarak açıklanmıştır.

## **6. Araştırma Bulguları ve Tartışma**

Eti Alüminyum A.Ş.'den alınan kırmızı çamur örneğinin ve adsorpsiyon sonrası örneklerin karakterizasyonu yapılmıştır. Kırmızı çamura ait elementel kompozisyonunu Çizelge 6.1'de XRF analiz sonuçları verilmiştir.

**Çizelge 6.1.** Kırmızı çamura ait elementel analiz

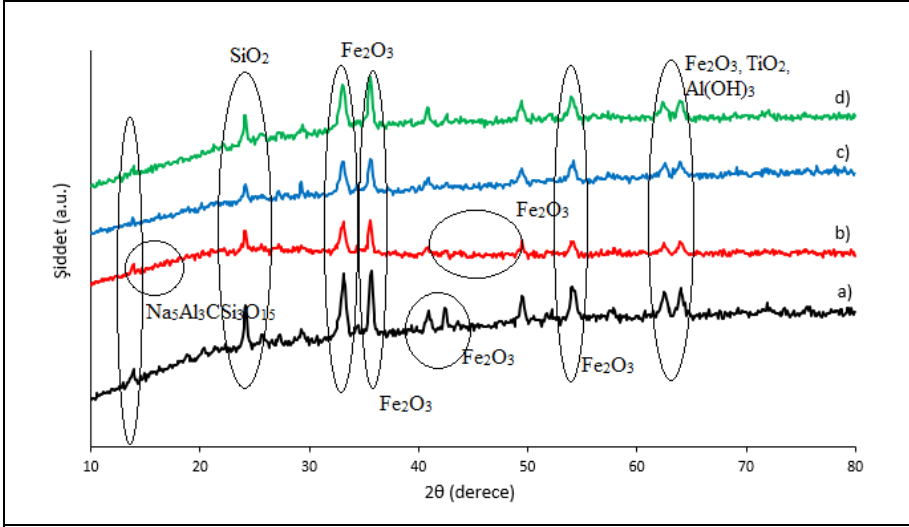
<b>Analizler</b>	<b>Birim</b>	<b>Sonuç</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	55,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2,51
SiO <sub>2</sub>	%	14
CaO	%	8,58
TiO <sub>2</sub>	%	16,27
Diğer	%	3,45

### **6.1. Adsorpsiyon Öncesi ve Sonrası Karakterizasyonu**

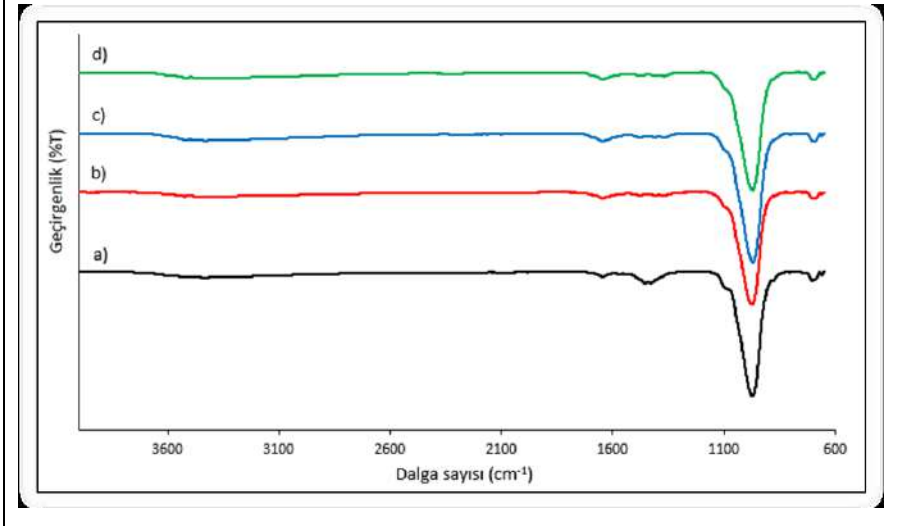
Şekil 6.1.(a)'de kırmızı çamura ait XRD analizinde, karakteristik pikler (Barud ve arkadaşları, 2011; Kılıç ve arkadaşları, 2013) verilmiştir. Kırmızı çamur yapısında 30° - 40° (2θ) ve 50° - 60° aralığında bulunan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> piklerinin sıcaklığa bağlı olarak kaybolmadığı gözlemlenmiştir. Ancak, 40° - 50° (2θ) aralığındaki karakteristik Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> piklerinin sıcaklık arttıkça kaybolduğu görülmüştür. Kırmızı çamur, ICDD (PDF2.DAT) kart numarası 01-089-0596 ve kimyasal formülü Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olan hematit olarak tanımlanmıştır. Ayrıca bu baskın fazın yanında, yapıda bulunabilecek diğer fazın Na<sub>5</sub>Al<sub>3</sub>CSi<sub>3</sub>O<sub>15</sub> olduğu ve 10°-20° (2θ) aralığında yer aldığı belirtilmiştir.

100 ppm malahit yeşili adsorpsiyonunda kullanılan kırmızı çamur için yapılan diğer bir yapısal analiz ise FT-IR'dir. Adsorpsiyon öncesi ve sonrası yüzeyde meydana gelen değişimler Şekil 6.1.(b)'deki FT-IR spektrumunda gösterilmiştir. FT-IR spektrumunda 690 cm<sup>-1</sup>, 970 cm<sup>-1</sup>, 1450 cm<sup>-1</sup> ve 1650 cm<sup>-1</sup> civarındaki pikler kırmızı çamurun yapısındaki Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ten kaynaklanmaktadır. Ayrıca, 1640 cm<sup>-1</sup> civarındaki pik H<sub>2</sub>O'ya

ve  $630\text{ cm}^{-1}$  civarındaki pik ise Al-O bağıını göstermektedir (Kılıç ve arkadaşları, 2013).



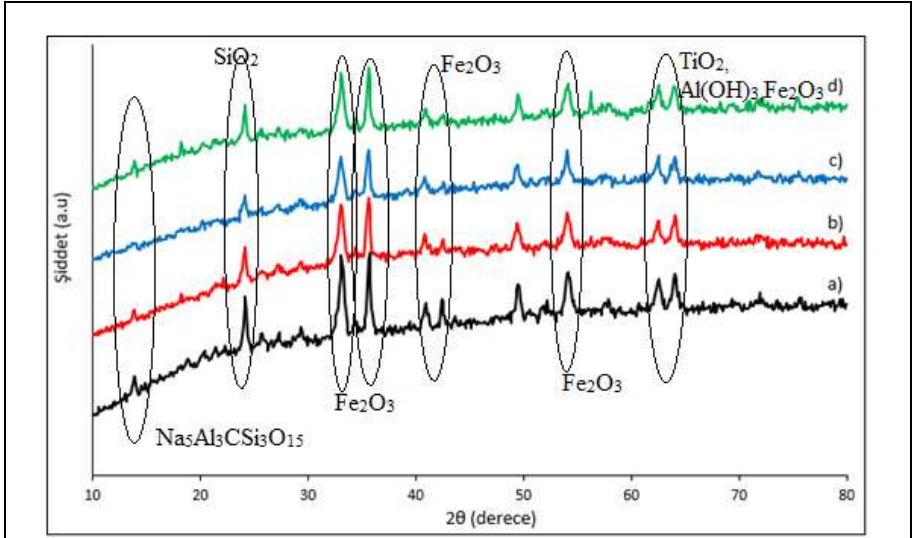
**Şekil 6.1.(a)** 100 ppm malahit yeşili boya gideriminde a: Kırmızı çamur, b:25°C, c:40°C ve d:60°C adsorpsiyon öncesi ve sonrası XRD analizi



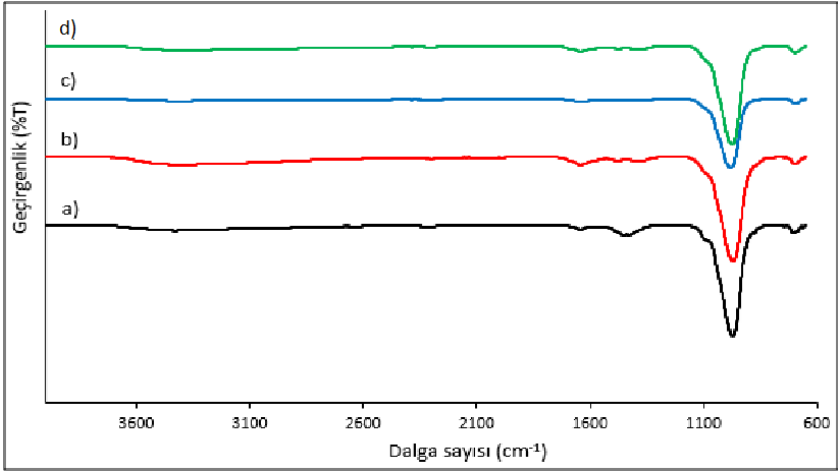
**Şekil 6.1.(b)** 100 ppm malahit yeşili boya gideriminde a: Kırmızı çamur, b:25°C, c:40°C ve d:60°C adsorpsiyon öncesi ve sonrası FT-IR analizi

Şekil 6.2.(a)'de, 200 ppm başlangıç konsantrasyonuna sahip malahit yeşili boyasının giderimi sonrası elde edilen XRD analizine ait karakteristik pikler (Barud ve arkadaşları, 2011; Kılıç ve arkadaşları, 2013) gösterilmiştir.  $2\theta$  değerleri  $10^\circ - 20^\circ$  arasındaki pikin,  $40^\circ\text{C}$ 'de gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmasında kaybolduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, farklı sıcaklıklarda yapılan adsorpsiyon çalışmalarında yapısal bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir.

Kırmızı çamuru ile 200 ppm malahit yeşili boyasının giderimi sonrası kırmızı çamur örneklerinin FT-IR analiz sonuçları Şekil 6.2.(b)'de sunulmuştur. Sonuçlara göre, kırmızı çamurun ana pikleri ile adsorpsiyon sonrası kırmızı çamur piklerinde belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. FT-IR spektrumunda yer alan  $690\text{ cm}^{-1}$ ,  $970\text{ cm}^{-1}$ ,  $1450\text{ cm}^{-1}$  ve  $1650\text{ cm}^{-1}$  civarındaki piklerin ise kırmızı çamurun yapısındaki  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 'ten kaynaklandığı düşünülmektedir.



**Şekil 6.2.(a)** 200 ppm malahit yeşili boya gideriminde a: Kırmızı çamur, b:25°C, c:40°C ve d:60°C adsorpsiyon öncesi ve sonrası XRD analizi

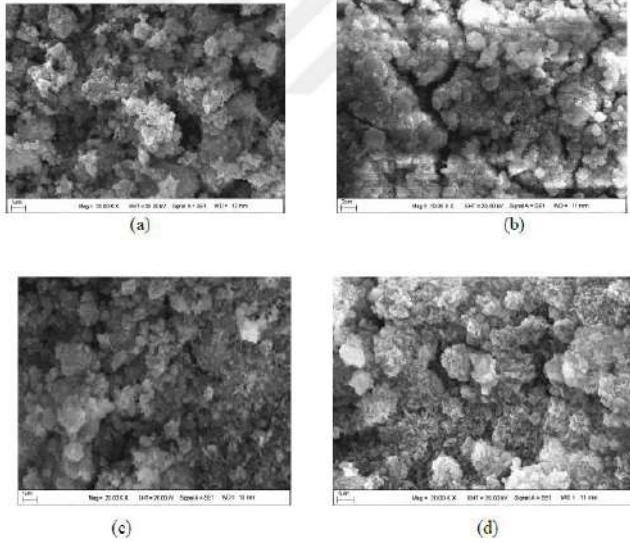


**Şekil 6.2.(b)** 200 ppm malahit yeşili boya gideriminde a: Kırmızı çamur, b:25°C, c:40°C ve d:60°C adsorpsiyon öncesi ve sonrası FT-IR analizi

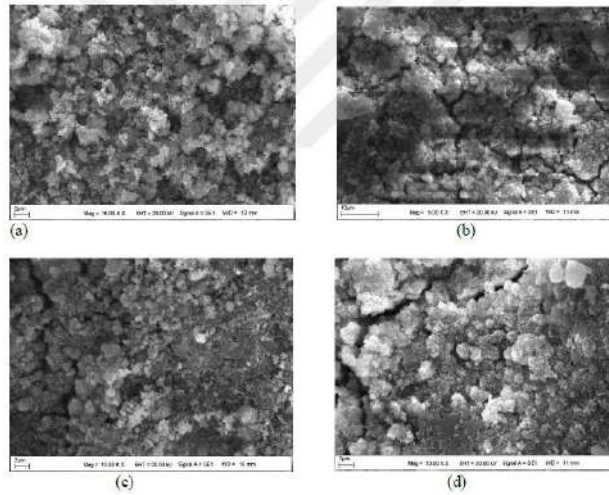
Şekil 6.3’de kırmızı çamura ait 100 ppm malahit yeşili adsorpsiyon öncesi (a) SEM görüntüleri ve sıcaklığa bağlı olarak adsorpsiyon sonrası SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.3.(a) incelendiğinde kırmızı çamurun yüzey kısımlarında farklı boyutlarda gözeneklerin olduğu ve ayrıca karbonatlı bileşiklerin ve agregaların yüzeyle biriktiği görülmektedir (Zhang, 2001). Gözeneklerin fazla olması, yapısında bulunan farklı bileşiklerin sulu ortamda iyonlaşması gibi özelliklerden dolayı kırmızı çamuru boya gideriminde kullanılabilecek uygun bir adsorban adayı olacağını göstermektedir.

Şekil 6.3 (b) ile gösterilen 25°C’de, Şekil 6.3 (c) 40°C’de ve Şekil 6.3 (d)’de ise 60°C yapılan adsorpsiyon işlemi sonrasında oluşan SEM görüntüleridir. Şekil 6.4’de de kırmızı çamur (Şekil 6.4.(a)) ve başlangıç boya konsantrasyonu 200 ppm malahit yeşili çözeltisi ile yapılan deneyler sonrasında (b: 25°C, c: 40°C ve d: 60°C) kırmızı çamur numunelerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Sıcaklığın artmasıyla beraber boya moleküllerinin kırmızı çamur yüzeyinde birikmeye başladığı görülmektedir. Ayrıca gözeneklere boya moleküllerinin tutulmasıyla gözeneklerin azaldığı görülmektedir. Sıcaklık artışı ile gerçekleşen, gözeneklerdeki azalma miktarı adsorpsiyonun gerçekleştiğini göstermektedir.





**Şekil 6.3** 100 ppm malahit yeşili adsorpsiyon öncesi kırmızı çamur (a) ve sonrası (b: 25°C, c: 40°C ve d: 60°C) kırmızı çamur örneklerinin SEM görüntüleri



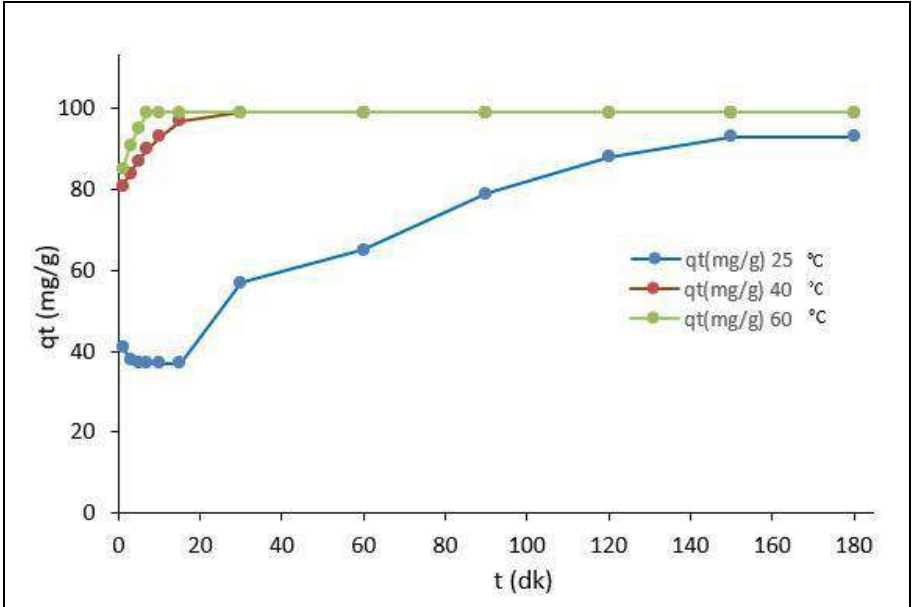
**Şekil 6.4.** 200 ppm malahit yeşili adsorpsiyon öncesi kırmızı çamur (a) ve sonrası (b: 25°C, c: 40°C ve d: 60°C) kırmızı çamur örneklerinin SEM görüntüleri

## 6.2. Sıcaklık ve Zaman Parametrelerinin Belirlenmesi

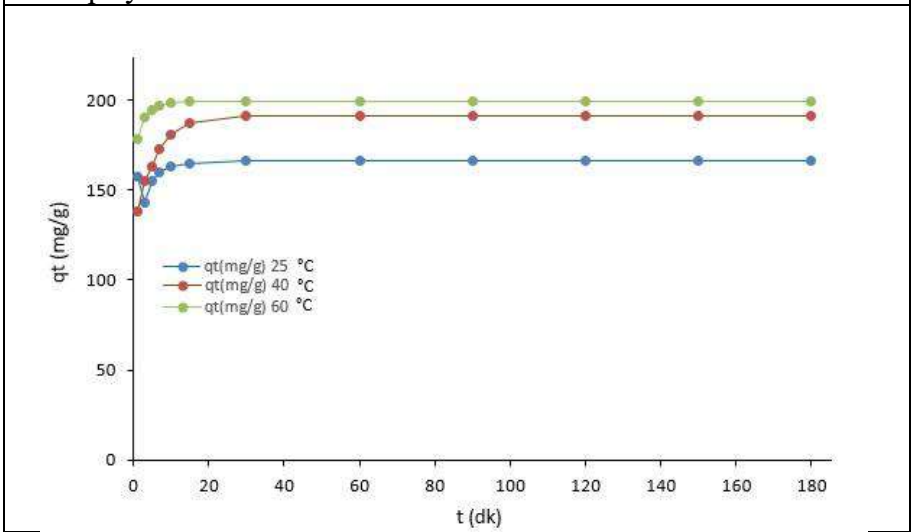
Kırmızı çamurun malahit yeşili boyasının giderimine zamana ve sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 6.5.(a)'da 100 ppm boya konsantrasyonu ve Şekil 6.5.(b)'de ise 200 ppm boya konsantrasyonu verilmiştir.

Belirlenen konsantrasyonlarda, 1000 mL hacmindeki boya çözeltilerine 1000 mg kırmızı çamur eklenmiştir. 25°C, 40°C ve 60°C sıcaklıklarında, ayrı çözeltili ortamlarında, 180 dakika süresince adsorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.5.(a)'de, sıcaklığa bağlı olarak 180 dakika boyunca 100 ppm malahit yeşili boyasının giderimi gösterilmiştir. 25°C'de, adsorpsiyon ilk 20 dakika boyunca sınırlı bir artış gösterirken, 20 dakikadan sonra hızlanmış ve 180 dakikada dengeye ulaşmıştır. 40°C ve 60°C'de ise ilk 30 dakika içinde maksimum adsorpsiyon kapasitesine ulaşılmıştır.

Ayrıca, kırmızı çamur için 200 ppm başlangıç konsantrasyonuna sahip malahit yeşili boyasında 25°C, 40°C ve 60°C sıcaklıklarda adsorpsiyon çalışması yapılmıştır. Bu amaçla, 1 g kırmızı çamur, 200 ppm konsantrasyonda 1 L malahit yeşili çözeltilisine ilave edilmiştir. Her üç sıcaklık için de 180 dakika süresince belirli aralıklarla örnekler alınarak, UV-vis spektrofotometrede 617 nm dalga boyunda ölçümler yapılmıştır. Şekil 6.5.(b)'de görüldüğü gibi, adsorpsiyon miktarı ilk 30 dakikada en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Sıcaklık arttıkça adsorpsiyon miktarı artmış olup, 60°C'de en yüksek adsorpsiyon seviyesine ulaşılmıştır.



Şekil 6.5.(a) Sıcaklık ve zamana bağlı 100 ppm malachit yeşili adsorpsiyonu



Şekil 6.5.(b) Sıcaklık ve zamana bağlı 200 ppm malachit yeşili adsorpsiyonu

### 6.3. İzoterm Parametrelerinin Karşılaştırılması

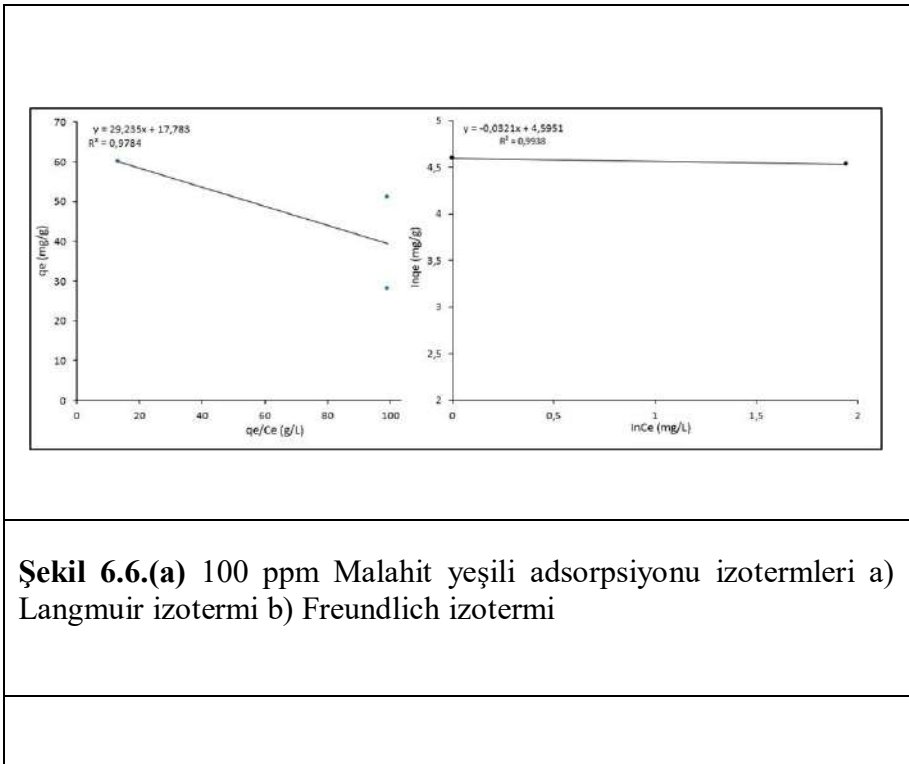
Şekil 6.6.(a)'de kırmızı çamurun malahit yeşili adsorpsiyonuna ait Langmuir ve Freundlich izotermi, Çizelge 6.2.(a)'de ise bu izotermelere ait hesaplamalar sunulmuştur. Langmuir izoterm modelinde, malahit yeşili boyasının adsorpsiyon kapasitesi ( $q_m$ ) 17,783 mg/g, Langmuir izoterm sabiti (KL) 0,03421 L/mg ve korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,98 olarak hesaplanmıştır. Langmuir izoterm modeline göre tek tabakalı adsorpsiyon gerçekleşmekte olup, boyutsuz ayırma faktörü (RL) 0,2262 olarak bulunmuş ve fiziksel adsorpsiyonun gerçekleştiğini göstermektedir. Sonuçlar, kırmızı çamurun malahit yeşili adsorpsiyonunda Langmuir izoterm denkleminde uyduğunu ortaya koymaktadır.

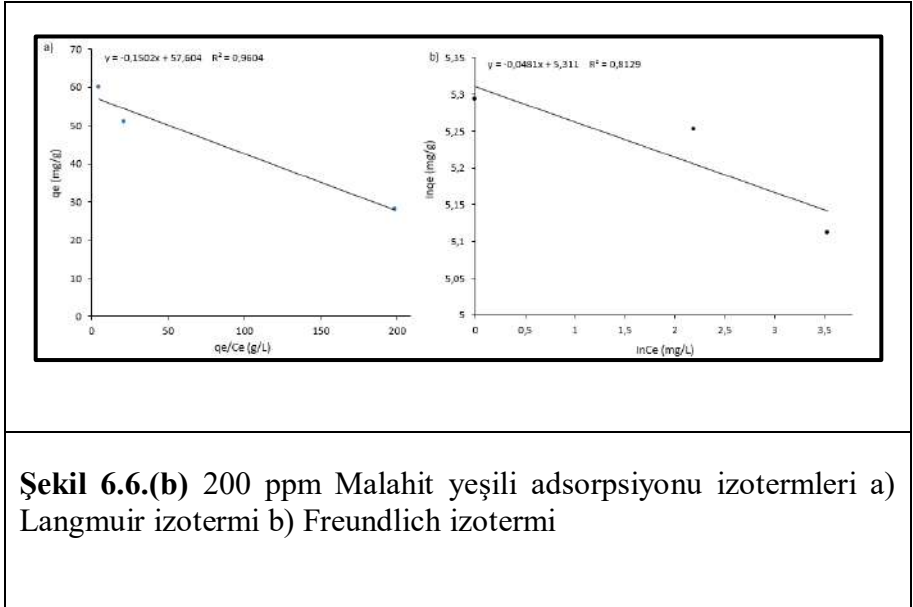
Freundlich izoterm modelinde ise, malahit yeşili boyasının adsorpsiyonu için yapılan hesaplamalarda, n değeri -31,1527 g/L olarak bulunmuş; kırmızı çamurun malahit yeşili adsorpsiyon kapasitesi (KF) 98,998 mg/g ve korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,99 olarak hesaplanmıştır. Korelasyon katsayısının yüksek olması, adsorpsiyon sürecinin Langmuir izoterminden çok Freundlich izoterm modeline daha uygun olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.6.(b) ve Çizelge 6.2.(b)'de ise kırmızı çamurun 200 ppm malahit yeşili boyası adsorpsiyon izotermi için Langmuir ve Freundlich izoterm hesaplamaları verilmiştir. Langmuir izoterm modeline göre adsorpsiyon kapasitesi ( $q_m$ ) 57,604 mg/g, Langmuir sabiti (KL) -6,658 L/mg ve korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,96 olarak hesaplanmıştır. Boyutsuz ayırma faktörünün (RL)  $7,52 \times 10^{-4}$  ve sifıra çok yakın olması,

adsorpsiyonun geri dönüşümünün olmadığını ifade etmektedir. Bu sonuçlara göre ise , boyanın kimyasal adsorpsiyona daha uygun olduğu düşünülmektedir.

Freundlich izotermi analizine göre ise,  $\ln(q_e - q_t)$  ile  $q_e/C_e$  karşılaştırılarak hesaplanan n sabiti -20,790 olarak bulunmuş; kırmızı çamurun 200 ppm'lik malahit yeşili adsorpsiyon kapasitesi (KF) 202,55 mg/g ve korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,81 olarak elde edilmiştir. Sonuçlar, kırmızı çamurun 200 ppm malahit yeşili boyasının adsorpsiyon izoterminde Freundlich izoterm modelinin daha uygun olduğunu göstermektedir.





**Çizelge 6.2.(a)** 100 ppm boya izoterm parametreleri

Langmuir		Freundlich	
Parametre	Sonuç	Parametre	Sonuç
$q_m$ (mg/g)	17,783	$n$ (g/L)	-31,153
$K_L$ (L/mg)	0,0342	$K_F$ (mg/g)	98,998
$R_L$	0,2262	$R^2$	0,99
$R^2$	0.98		

**Çizelge 6.2.(b)** 200 ppm boya izoterm parametreleri

Langmuir		Freundlich	
Parametre	Sonuç	Parametre	Sonuç
$q_m$ (mg/g)	57,604	$n$ (g/L)	-20,790
$K_L$ (L/mg)	-6,658	$K_F$ (mg/g)	202,55
$R_L$	$7,52 \times 10^{-4}$	$R^2$	0,81
$R^2$	0,96		

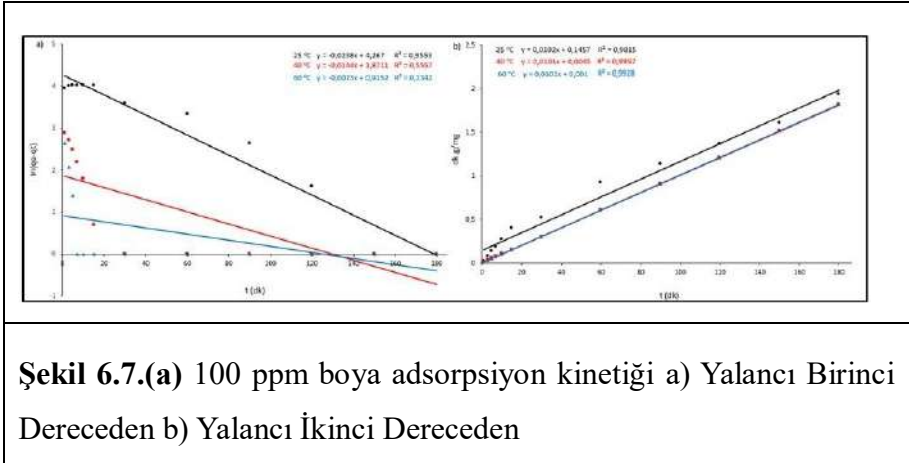
#### 6.4. Kinetik Modellerinin Karşılaştırılması

Kırmızı çamurun malahit yeşili adsorpsiyonuna ait yalancı birinci ve yalancı ikinci dereceden kinetik model analizlerinin grafik ve hesaplamaları Şekil 6.7.(a) ve Çizelge 6.3(a)'de sunulmuştur. Yalancı birinci dereceden kinetik modelde, düşük regresyon katsayısı (0,23-0,96) ve sıcaklık arttıkça birim başına adsorplanan malahit yeşili miktarındaki değişimler, bu modelin adsorpsiyon sürecine kısmen uygun olduğunu göstermektedir. Diğer yandan, yalancı ikinci dereceden kinetik modelde ise daha yüksek regresyon değerleri elde edilmiş olup, sıcaklığın artmasıyla  $h$  ve  $K$  değerlerinin artışı bu modele daha iyi uyum sağlamaktadır. Sonuçlar, kırmızı çamurun malahit yeşili adsorpsiyonu için yalancı ikinci dereceden kinetik modelin daha uygun olduğunu göstermektedir.

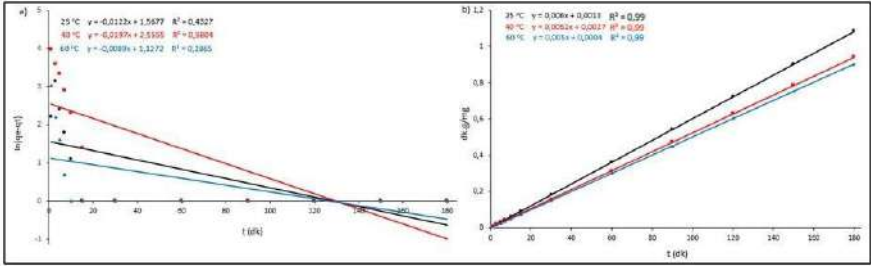
Kırmızı çamurun 200 ppm malahit yeşili adsorpsiyonu için yalancı birinci ve ikinci dereceden kinetik eşitliklere ait grafikler, Şekil 6.7.(b) ve Çizelge 6.3.(b)'de verilmiştir. Yalancı birinci dereceden kinetik modelde, düşük korelasyon katsayısı (0,29-0,58) bu modele uygun

olmadığını gösterirken, kırmızı çamur birim başına düşen malahit yeşili boya miktarının 3-12 mg arasında olması ve düşük  $K_1$  hız değeri de bu uyumsuzluğu desteklemektedir. Bu nedenle, yalancı birinci dereceden kinetik modelin bu adsorpsiyon süreci için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Yalancı ikinci dereceden kinetik modelde ise korelasyon katsayısının 1'e yakın olması ve yüksek  $h$  değerleri modelin uygunluğunu desteklemektedir. 'h' başlangıç adsorpsiyon hızını ifade etmekte olup,  $h=K_2(qe)^2$  eşitliği ile verilmektedir; burada  $qe$ , denge anında adsorplanan madde miktarını (mg/g) ve  $K_2$ , ikinci dereceden adsorpsiyon hız sabitini (g/(mg·dak)) ifade etmektedir. 160-200 mg/g arasında değişen yüksek adsorban kapasitesi, kırmızı çamurun malahit yeşili adsorpsiyonunda yalancı ikinci dereceden kinetik modelle daha iyi uyum sağladığını ortaya koymaktadır.







**Şekil 6.7.(b)** 200 ppm boya adsorpsiyon kinetiği a) Yalancı Birinci Dereceden b) Yalancı İkinci Dereceden

**Çizelge 6.3.(a)** 100 ppm boya adsorpsiyon kinetik parametreleri

Kinetik Model	Konsantrasyon (mg/L)	Parametre	Sıcaklık (°C)		
			25	40	60
Yalancı Birinci Dereceden Kinetik	100	$q_e$ (mg/g)	71,307	6,4554	2,4973
	100	$K_1$ (1/min)	0,0238	0,0144	0,0073
	100	$R^2$	0,96	0,56	0,23
Yalancı İkinci Dereceden Kinetik	100	$q_e$ (mg/g)	98,039	99,009	99,009
	100	$K_2$ ( $\times 10^{-3}$ ) (g/mg.min)	0,7104	22,67	102,01
	100	$h$ (mg/g.min)	6,863	222,2	1000
	100	$R^2$	0,98	0,99	0,99

**Çizelge 6.3.(b)** 200 ppm boya adsorpsiyonunun kinetik parametreleri

Kinetik Model	Konsantrasyon (mg/L)	Parametre	Sıcaklık (°C)		
			25	40	60
Yalancı Birinci Dereceden Kinetik	200	$q_e$ (mg/g)	4,7956	12,878	3,087
	200	$K_1$ (1/min)	0,0122	0,0197	0,0089
	200	$R^2$	0,43	0,58	0,29
	200	$q_e$ (mg/g)	166,67	192,31	200
Yalancı İkinci Dereceden Kinetik	200	$K_2$ (g/mg.min)	0,028	0,010	0,0625
	200	$h$ (mg/g.min)	769,23	370,37	2500
	200	$R^2$	0,99	0,99	0,99

## 7. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, alüminyum tesis atığı olan kırmızı çamur, başlangıç boya derişimlerinin 100 ppm ve 200 ppm malahit yeşili boyasının gideriminde adsorban olarak kullanılmış ve adsorpsiyon kapasitesi belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- 25°C sıcaklıkta boya giderimi 30. dakikadan sonra başlamış ve zamanla artmıştır; boya giderim dengesi 150. dakikada sağlanmıştır.
- 40°C ve 60°C sıcaklıklarda adsorpsiyon kapasitesi, 25°C'de elde edilen verilere göre belirgin şekilde yüksektir. Çözeltiden boya giderimi yaklaşık 30. dakikada dengeye ulaşmıştır.
- Langmuir izoterm modelinde, korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,98, Langmuir izoterm sabiti (KL) 0,03421 L/mg ve adsorpsiyon kapasitesi ( $q_m$ ) 17,783 mg/g olarak hesaplanmıştır.
- Freundlich izoterm modelinde ise korelasyon katsayısı 0,99 ve adsorpsiyon kapasitesi (KF) 98,998 mg/g olarak belirlenmiştir.

Bu, kırmızı çamur adsorpsiyonunun Freundlich izoterm modeline daha uygun olduğunu göstermektedir. Yani, adsorpsiyon çok tabakalıdır ve adsorplayıcı yüzeyi heterojendir.

- Üç farklı sıcaklıkta yapılan analizler,  $R^2$  değerinin (sırasıyla  $25^{\circ}\text{C}$ 'de 0,98,  $40^{\circ}\text{C}$  ve  $60^{\circ}\text{C}$ 'de 0,99) yalancı ikinci dereceden kinetik modeline uyum gösterdiğini ortaya koymuştur.
- 200 ppm başlangıç konsantrasyonu ile yapılan çalışmada, üç farklı sıcaklıkta ilk 30 dakika içerisinde boya gideriminin dengeye geldiği gözlemlenmiştir. Langmuir izoterm modeline göre, korelasyon katsayısı 0,96 olmasına rağmen, boyutsuz ayırma faktörü (RL)  $7,52 \times 10^{-4}$  olup, sıfıra yakın değeri adsorpsiyonun geri dönüşümünün olmadığını göstermektedir. Adsorpsiyon kapasitesi ( $q_m$ ) 57,604 mg/g ve Langmuir izoterm sabiti (KL) -6,658 L/mg olarak hesaplanmıştır.
- Freundlich izoterm modelinde ise adsorpsiyon kapasitesi (KF) 202,55 mg/g ve  $R^2$  değeri 0,81 olarak hesaplanmıştır.
- Kinetik modeller arasında, yalancı ikinci dereceden kinetik modelinin ( $R^2=0,99$ ) daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, malahit yeşili boyasının gideriminde kullanılan kırmızı çamurun hiçbir işlem görmeden kullanılmasının mümkün olduğu görülmüştür. Adsorpsiyon sonrası yapılan yapısal karakterizasyon analizleri, var olan gözeneklerde boya moleküllerinin tutulduğunu göstermektedir. Kırmızı çamurun yapısında yüksek oranda bulunan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (%55,19) fazında belirgin bir yapısal değişiklik olmamasına rağmen, yüksek adsorpsiyon kapasitesi, farklı fazların adsorpsiyon

sürecinde etkili olabileceğini ortaya koymaktadır. Alüminyum üretimi esnasında ortaya çıkan ve endüstriyel bir atık olarak değerlendirilen kırmızı çamurun farklı bir çevresel soruna potansiyel bir çözüm olabileceği ön görülmüştür.

### **Çıkar Beyanı**

Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkileyebilecek bilinen herhangi bir rekabet eden mali çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan etmektedirler.

### **Teşekkürler**

Yüksek lisans tez çalışmasında desteklerini eksik etmeyen Dr. Selda SEZER'e, Maden Yüksek Mühendisi İbrahim DUMAN' a ve Maden Yüksek Mühendisi Ramazan AYDOĞMUŞ'a teşekkür ederiz. Tüm yazarlar, Eti Alüminyum A.Ş. Seydişehir İşletmesi' ne hammaddenin sağlanmasında, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (Proje Numarası: **FDK-2020-2114**) verdikleri finansal destek ve İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi'ne verdikleri cihaz desteği için teşekkür etmek isterler.

## KAYNAKLAR

- Akbıyık, H. (2018). Bayer Prosesinde Ortaya Çıkan Kırmızı Çamurun Renk Gideriminde Kullanılması İçin Yenilikçi Yöntemlerin Araştırılması, (Yüksek Lisans Tezi), Bolu İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Bolu.
- Akıncı, A. (2004). Polimer Matrisli Kompozitlerde Katkı Malzemelerinin Yapı ve Özelliklere Etkisi, (Doktora Tezi), SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Sakarya.
- Arslan, S. (2016). Eti Alüminyum A. Ş. Kırmızı Çamurunun Susuzlandırma Performansının Artırılması, (Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- Atun, G., Ortaboy, S., Tüzün, E., & Türker Acar, E. (2023). A comparison of anionic and cationic dye removal efficiency of industrial bauxite waste red-mud. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 44(1), 144-156).
- Babu, A. N., Reddy, D. S., Sharma, P., Kumar, G. S., Ravindhranath, K., and Mohan, G. K. (2019). Removal of hazardous indigo carmine dye from waste water using treated red mud. *Materials Today: Proceedings*, 17, 198-208.
- Barud, H., S., Regiani, T., Margues, R., F., C., Lustri, W., R., Messaddeq, Y. and Ribeiro, S., J., L., (2011). Antimicrobial Bacterial Cellulose-Silver Nanoparticles Composite Membranes, *Journal of Nanomaterials*, Volume 211, Article ID721631, 8 pages, Brasil

- Borra, C. R., Pontikes, Y., Binnemans, K. and Van Gerven, T. (2015) Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud), *Minerals Engineering*, 76, 20-27.
- Chegeni, M., Mehri, M., and Dehdashtian, S. (2021). Photocatalytic bauxite and red mud/graphitic carbon nitride composites for Rhodamine B removal. *Journal of Molecular Structure*, 1242, 130752.
- Çetinkaya, Z., (2018). Kırmızı Çamurdan Üretilen Nano ipliklerin Arsenik Arıtımında Uygulanması (Doktora Tezi), Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- Duman, S. (2022). Kırmızı Çamurun Adsorpsiyon Yöntemi İle Boya Gideriminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi), İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya
- Fang, W., Zhou, Y., Cheng, M., Yang, J., Huang, Q., Huang, Z., ... & Li, B. (2024). Effective adsorption performance and mechanism of methylene blue from dye wastewater by humic acid sucrose-modified red mud. *Process Safety and Environmental Protection*
- Kalsen, T. S. A., (2018). Kırmızı Çamurdaki Değerli Metallerin Hidrometalurjik Proseslerle Kazanılması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Karpuz, G., (2020), Montmorillonit Ve Kırmızı Çamur Katkılı Aljinat Bazlı Mikrokürelerin Sentezi ve Boya-Metal İçeren Atıksuların Arıtımı, (Yüksek Lisans Tezi) Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun
- Kátai-Urbán, L., and Cséplı, Z. (2010). Disaster in the Ajka Red Sludge Reservoir. In Sixth Meeting of the Conference of the Parties to

the Convention on the Transboundary Effects of Industrial Accidents, The Hague (pp. 8-10).

Kaya, E. (2010). Seydişehir Kırmızı Çamur Atığının Seramik Sanatında Değerlendirilmesinin Araştırılması

Kazak, O., Eker, Y. R., Akin, I., Bingol, H., and Tor, A. (2017). A novel red mud@sucrose based carbon composite: Preparation, characterization and its adsorption performance toward methylene blue in aqueous

Kılıç, Y., Günay, E., Kara, M., Arslan, G., Yılmaz N. ve Marşoğlu M. (2013), Kırmızı Çamurun Renkli Beton Üretiminde Pigment Olarak Kullanımı, ( EUREKA E!3824 INWASCOMP-“ From Industrial Wastes to Commercial Products” ve TEYDEB 1509-9090031 “Endüstriyel Atıklardan Ticari Ürünler”) s. 449-558

Krishnamurthy, N. ve Gupta, C.K., (2015). Extractive metallurgy of rare earths: CRC press. (Yüksek Lisan Tezi), Selçuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya

Li, J., Xu, L., Sun, P., Zhai, P., Chen, X., Zhang, H., and Zhu, W. (2017). Novel application of red mud: Facile hydrothermal-thermal conversion synthesis of hierarchical porous AlOOH and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> microspheres as adsorbents for dye removal. Chemical Engineering Journal, 321, 622-634.

Li, P., Yang, Z., Li, Y., & Tian, Y. (2024). Preparation of efficient adsorbent for methylene blue and Congo red by co-hydrothermal of red mud with food waste compost. Desalination and Water Treatment, 100791

- Namasivayam, C., Yamuna, R. T., and Arasi, D. J. S. E. (2002). Removal of procion orange from wastewater by adsorption on waste red mud. *Separation Science and Technology*, 37(10), 2421-2431.
- Namasivayam, C., Yamuna, R., and Arasi, D. J. S. E. (2001). Removal of acid violet from wastewater by adsorption on waste red mud. *Environmental Geology*, 41(3), 269-273.
- Özgün, M. A., (2012). Kırmızı Çamur Üretimi Ve Değerlendirme Olanakları (Yüksek Lisans Semineri). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta
- Ruyters, S., Mertens, J., Vassilieva, E., Dehandschutter, B., Poffijn, A., and Smolders, E. (2011). The red mud accident in Ajka (Hungary): plant toxicity and trace metal bioavailability in red mud contaminated soil. *Environmental science & technology*, 45(4), 1616-1622.
- Thakare, S. R., Thakare, J., Kosankar, P. T., and Pal, M. R. (2020). A chief, industrial waste, activated red mud for subtraction of methylene blue dye from environment. *Materials Today: Proceedings*, 29, 822-827.
- Tor, A., and Cengeloglu, Y. (2006). Removal of congo red from aqueous solution by adsorption onto acid activated red mud. *Journal of hazardous materials*, 138(2), 409-415.
- Uzun, D., (2006). Kırmızı Çamurdan Demir ve Alüminyumun Sülfirik Asit Çözeltisindeki Çözünme Kinetiği (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya



- Varol, M. (2019). Kırmızı çamurdan pirometalurjik yöntemle demirin geri kazanımı (Master's thesis, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Genel Fizik Bilim Dalı.
- Zhang, Y., Qu, Y., Wu, S., Engineering geological properties and comprehensive utilization of the solid waste (red mud) in aluminium industry, Received: 7 March 2001 / Accepted: 25 June 2001 Published online: 5 September 2001



## **BÖLÜM 3**

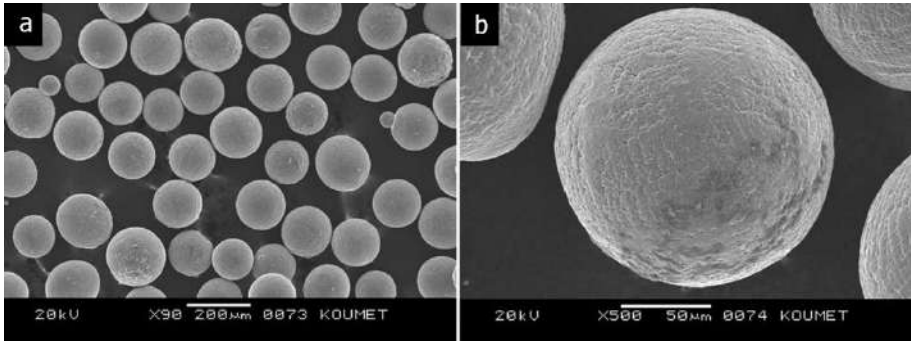
### **BASINÇ DESTEKLİ SİNERLEME TEKNİKLERİNDE MİKROYAPIYA GENEL BİR BAKIŞ**

Prof. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU

#### **GİRİŞ**

Bir malzeme üretim tekniği olarak toz metalurjisi günümüzde birçok uygulamada karşımıza çıkmaktadır. Toz metalurjisi partiküllerden oluşan bir yığın bir kalıp içinde basınç ile şekillendirilmesi ve ardından ergime sıcaklığının altında sinterlenmesi esasına dayanır (Upadhyaya, 1997). Geleneksel toz metalurjisinde preslemeden gelen birçok parça fırınlarda aynı anda sinterlenir. Sinterleme için en büyük katkı preslemede elde edilen yoğunluktan kaynaklanır. Kullanılan malzemenin türüne bağlı olarak preslemede az veya yüksek yoğunluk elde edilir (Danninger, 2018.). Örneğin metaller sünek karakterde olduklarından şekillendirme ile soğuk preslerde yüksek yoğunluk elde edilebilir. Fakat seramikler yüksek sertlikleri nedeniyle şekillendirme kaynaklı yoğunluk açısından metaller kadar verimli değillerdir. Dolayısıyla malzemelerin özelliklerine bağlı olarak sinterleme süreçleri kontrol edilebilir. Her durumda sinterleme partiküllerin temas noktalarında difüzyonun sağlanması için olmazsa olmazdır (Ivasishin vd., 2008). Tozlar kalıba yerçekimi etkisi altında veya basınç ile doldurulabilir. Şekil 1’de plazma destekli döner elektrot prosesi (PREP) ile üretilmiş 4140 çeliğine ait bir toz görüntüsü yer

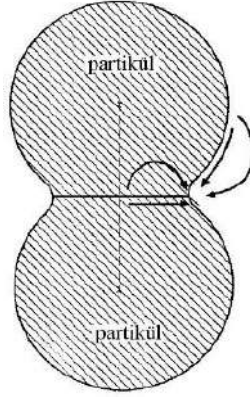
almaktadır (Yamanoglu vd., 2013). Tozlar her zaman bu tarz küresel formda olmamalarına rağmen sinterlemede her partikülün temas noktalarında boyun oluşumu ve bu boyunun büyümesi sinterleme ile gerçekleşir. Şekil 1b’de 4140 çeliği tozuna ait tek bir partikülün sinterleme sonrasında diğer partiküllerle birleşerek gözeneksiz bir yapı oluşturması beklenir. Sistemde yer alan tüm partiküllerden aynı şekilde bir konsolidasyon beklenir (Yamanoglu vd., 2016).



Şekil 1. PREP ile üretilmiş 4140 çeliği tozunun SEM görüntüleri, a) düşük ve b) yüksek büyütme (Yamanoglu vd., 2013)

Toz metalurjisinde sinterlemenin partikül bazında anlaşılması için partiküller küre formunda kabul edilip farklı modellemeler yapılır. Bunlardan en önemlisi iki küre sinterleme modelidir. Şekil 2’de iki küresel partikülün temas noktalarında oluşan boyun ve bu boyun bölgesinin büyümesi için gerekli difüzyonu gerçekleştiren atomların hareket yönleri ve mesafeleri gösterilmektedir (Wong-Ángel vd., 2014). Bu tarz bir mekanizmanın doğası partiküllerin sahip oldukları enerjinin azaltılmasıdır. Partiküller oluşurken ortaya çıkan enerjinin geri alınması sinterlemede gerçekleşir. Bir partikül temas ettiği diğer partiküller ile

birleşerek enerjisini azaltır. Bu enerji azalması partiküllerin birleşim yerlerine yüzeyden ve hacimden atom hareketi ile gerçekleşir. Sonuç iki partikül üzerinden düşünülürse daha büyük boyut tek bir partikül oluşumu ile süreç tamamlanır. Tabi burada artık sinterleme sonrasında partikül kavramını tane kavramı ile değiştirmek daha doğru olacaktır (Invenson, 2012). Sinterleme teorik olarak beklendiği gibi gerçekleşir ise partikül sınırları artık tane sınırlarına dönüşür ve tanım değişikliği de yapmak doğru olacaktır. Sinterleme için sıcaklık ve zaman parametreleri geçerlidir. Her ikisinin de kontrolü ile sinterleme ve iç yapı kontrol edilir. Bazı durumlarda ısıtma hızı bazı durumlarda da bekleme süreleri ile nihai malzemenin mikroyapısı üzerinden özellikler optimize edilir (Asl vd., 2018). Geleneksel toz metalurjisinde sinterleme malzemelerin türüne göre koruyucu atmosferde veya açık atmosfere yapılabilir. Geleneksel sinterleme de tozların yoğunlaşması için uzun sürelere ihtiyaç vardır. Uzun süreler mikroyapıda kabalaşmalara neden olabilir. Özellikle seramikler için yüksek sıcaklığa maruz kalınması durumunda mekanik ve fiziksel özelliklerde azalma meydana gelir. Bu nedenle geleneksel sinterlemeye göre alternatif koşullar sunan farklı prosesler geliştirilmiştir. Basınç destekli sinterleme olarak adlandırılan bu proseslerin birçok farklı türü bulunmaktadır (Antou vd., 2015). Basınç altında sinterleme daha düşük sıcaklık ve daha kısa sürelerde malzemelerin üretimine imkan tanır. Bu çalışmada da basınç destekli sinterleme ile elde edilen malzemelerin sinterleme koşullarının iç yapılarına etkileri araştırılmıştır.

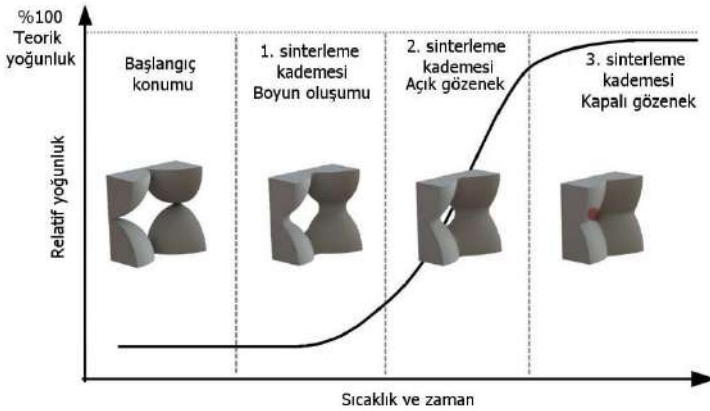


Şekil 2. İki partikülün sinterlenmesi sırasında atom difüzyonu  
(Rahaman, 2017)

## **BASINÇ DESTEKLİ SİNERLEME TEKNİKLERİNİN İÇ YAPIYA ETKİSİ**

Basınç destekli sinterleme tekniklerinde sinterleme sıcaklık ve basıncın eş zamanlı uygulanması ile gerçekleşir. Sıcaklık ile basıncın beraber kullanılması yoğunluk artışında önemli bir katkı sunmaktadır (Yamanoglu vd., 2021; Yamanoglu, 2015). Basınç destekli sinterleme teknikleri için en önemli üç teknik sıcak izostatik presleme, sıcak pres ve kıvılcım plazma sinterleme tekniğidir. Basınç destekli sinterleme tekniklerinde yoğunluk artışı ile birlikte mikroyapısal olarak da geleneksel yöntemlere göre değişiklikler dikkati çeker. Şekil 3'te partiküllerin sinterleme sırasında temas noktalarını ve yapıda kalan gözenekleri şematik açıklayan bir görüntü yer almaktadır. Başlangıçta partiküller noktasal temas halindedir, sıcaklık ve zaman artışı ile boyun oluşumu başlar ve hızlanır. 2. kademedeki küresel açık gözenekler oluşur. Son kademedeki ise giderilmesi zor olan ve yapıda büyük ihtimalle kalma

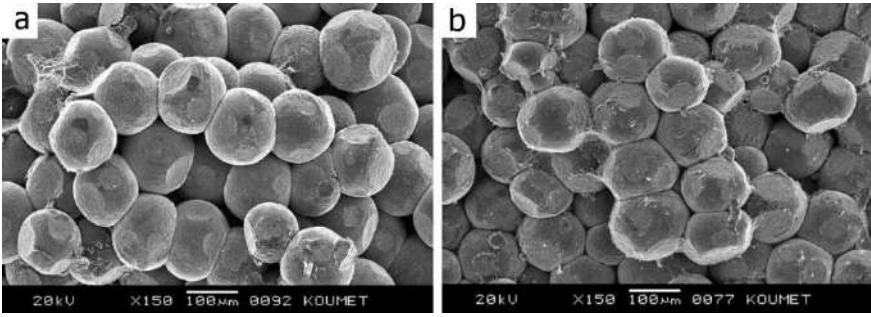
potansiyeli olan kapalı nispeten zararsız gözenekler kalır. Sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bu tarz bir mikroyapıda deformasyon etkisi görülmeden partiküllerin şekillerinde etkili bir değişim olmaz (Trunec vd., 2013)



Şekil 3. Sinterlemede farklı kademelerde gözenek yapıları (Trunec vd., 2013)

Fakat basınç destekli sinterleme söz konusu olunca partiküllerin yoğun deformasyonu dikkati oldukça fazla çekmektedir. Şekil 4'te kıvılcım plazma sinterleme ile üretilmiş 4140 çeliğinin makro SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4a ve 4b 800 °C'de 5 dakika ile sinterlenmiş görüntüleri sunmaktadır. İki görüntü arasındaki fark ısıtma hızlarından kaynaklanmaktadır. Şekil 4a'da ısıtma hızı 100 °C/dak iken Şekil 4b'de ısıtma hızı 200 °C/dak'dır. Her iki görüntüde ortak nokta basınç etkisi ile partiküllerde meydana gelen deformasyondur (Liu vd., 2018). Şekil 4'te sinterleme sonrası elde edilen görüntülerin ham tozu ise Şekil 1'de verilen küresel 4140 çelik tozlarıdır. Tozların ilk halleri ile sinterlenme sonrası yapıları basıncın etkisini net olarak

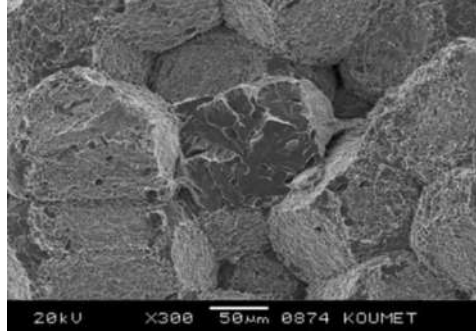
sergilemektedir. Basınç destekli olarak kıvılcım plazma sinterlemenin sunduğu bir diğer farklılık ise artan ısıtma hızı ile partiküller arasında oluşan plazma etkisi ile partiküllerin yüzeylerinin ergimesidir (Shongwe vd., 2016; Bahador vd., 2014). Şekil 4b’de bu etki birçok partikül yüzeyinde görülmektedir. Artan ısıtma hızı ile tozların yüzeylerinin çok yüksek sıcaklıklara ulaşması ile yoğunlaşma verimi artmaktadır. Basınç ve ısıtma hızı etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için seçilen numuneler düşük yoğunluklu seçilmiştir.



Şekil 4. SPS ile sinterlenmiş çelik tozunun farklı ısıtma hızlarında iç yapı SEM görüntüleri, a) 100 °C/dak, b) 200 °C/dak.

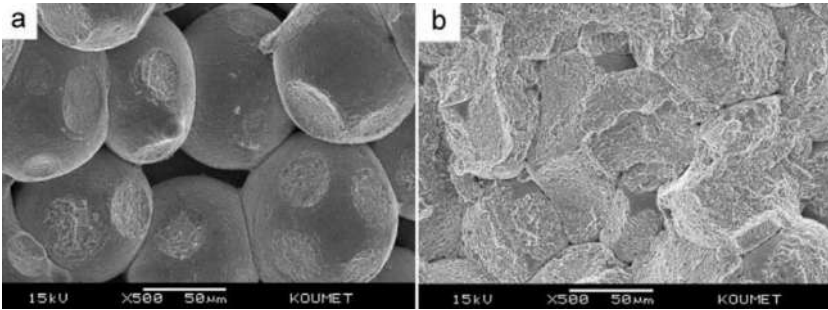
Aynı tozların 1000 °C’de sinterlenmesi ile elde edilen daha yüksek yoğunluğa sahip mikroyapı görüntüleri ile Şekil 5’te verilmiştir. Basınç altında sıcaklığın, sürenin ve ısıtma hızının artması ile Şekil 4’te yer alan görüntülere göre tamamen değişen bir yapı ortaya çıkmıştır. Partiküllerin küresel morfolojilerinden iz kalmamış ve partiküllerin koordinasyon sayıları oldukça fazla artmıştır. Yapıda çok az gözenek göze çarpmaktadır. Basıncın daha da artırılması ile bu nihai gözeneklerde yapıdan uzaklaştırılabilir karakterdedir.





Şekil 5. SPS ile sinterlenmiş 4140 çeliği tozunun mikroyapısı

Şekil 6’da yine SPS ile üretilmiş bir nikel alaşımının mikroyapısı verilmiştir. 75-106 µm boyuta sahip tozların kullanıldığı ve 50 MPa basınç altında gerçekleştirilen sinterlemede iki farklı sıcaklık etkisi sunulmuştur. Ham tozların şekilleri küresel bir forma sahipken yine artan sıcaklık ve basınç etkisi ile tozlardaki deformasyon net bir şekilde görülmektedir. Artan sıcaklık ile aynı zamanda yapıda yoğunlaşma ve partiküller arasındaki güçlü boyun oluşumu da etkilidir (Yamanoglu vd., 2014).



Şekil 6. Nikel alaşımının farklı sıcaklıklarda SPS ile sinterlenmesi sonucu elde edilen içyapı görüntüleri, a) 700 °C, b) 750 °C (Yamanoglu vd., 2014).

## SONUÇLAR

Toz metalurjisinde çok ince boyutlu genellikle de 150 mikron altı boyuta sahip partiküller şekillendirme sonrası sinterlenir. Bu sayede partiküllerin sahip oldukları yüksek enerji sinterlemede geri alınır. Aslında sinterleme kademesine toz boyutu, şekli, saflık, boyut dağılımı, sinterleme atmosferi gibi birçok parametre etkilidir. Sinterleme buna rağmen bir difüzyon süreci olduğundan sıcaklık ve zaman tüm sonucu doğrudan etkiler. Buna rağmen toz metalurjisinde sinterleme sırasında kullanılabilen basınç desteği yoğunluk ve dolayısıyla mekanik özellikleri önemli derecede olumlu etkiler. Fakat basınç desteği ile yapılan sinterlemenin genellikle seri üretime çok uygun olmadığını da belirtmek gerekir. Bu çalışmada basınç desteği altında sinterlenmiş bazı malzemelerin sinterleme sonrası iç yapıları incelenmiştir. Yüksek sıcaklıkla basınç eş zamanlı uygulandığında partiküllerin deformasyonu ile yoğunluğun etkili bir şekilde arttığı görülmüştür. Basıncın partiküllerin şekli üzerindeki deformasyon etkisi SEM görüntülerinden net bir şekilde görülmüştür. Geçekten de basınç destekli sinterleme teknikleri yüksek yoğunluk ve yüksek dayanım gerektiren uygulamalara daha kısa süre ve daha düşük sıcaklık koşullarında parça sunma imkanı tanırırlar.

## KAYNAKÇA

- Antou, G., Guyot, P., Pradeilles, N., Vandenhende, M., & Maître, A. (2015). Identification of densification mechanisms of pressure-assisted sintering: application to hot pressing and spark plasma sintering of alumina. *Journal of Materials Science*, 50, 2327-2336.
- Asl, M. S., Namini, A. S., Motallebzadeh, A., & Azadbeh, M. (2018). Effects of sintering temperature on microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered titanium. *Materials Chemistry and Physics*, 203, 266-273.
- Bahador, A., Umeda, J., Yamanoglu, R., Bakar, T. A. A., & Kondoh, K. (2021). Strengthening evaluation and high-temperature behavior of Ti-Fe-O-Cu-Si alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 800, 140324.
- Danninger, H. (2018). What will be the future of powder metallurgy. *Powder Metallurgy Progress*, 18(2), 70-79.
- Invenson, V. A. (2012). Densification of metal powders during sintering. Springer Science & Business Media.
- Ivasishin, O. M., Eylon, D., Bondarchuk, V. I., & Savvakina, D. G. (2008, May). Diffusion during powder metallurgy synthesis of titanium alloys. In *Defect and Diffusion Forum* (Vol. 277, pp. 177-185). Trans Tech Publications Ltd.
- Liu, Y., Zhang, H., Wang, L., Fan, X., Zhang, G., & Sun, F. (2018). Effect of sintering pressure on the porosity and the shear strength of the pressure-assisted silver sintering bonding. *IEEE*

*Transactions on Device and Materials Reliability*, 18(2), 240-246.

- Rahaman, M. N. (2017). *Ceramic processing and sintering*. CRC press.
- Shongwe, M. B., Ramakokovhu, M. M., Diouf, S., Durowoju, M. O., Obadele, B. A., Sule, R., & Olubambi, P. A. (2016). Effect of starting powder particle size and heating rate on spark plasma sintering of FeNi alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 678, 241-248.
- Trunec, M., & Maca, K. (2013). *Advanced Ceramics for Dentistry: Chapter 7. Advanced Ceramic Processes*. Elsevier Inc. Chapters.
- Upadhyaya, G. S. (1997). *Powder metallurgy technology*. Cambridge Int Science Publishing.
- Wong-Ángel, W. D., Téllez-Jurado, L., Chávez-Alcalá, J. F., Chavira-Martínez, E., & Verduzco-Cedeño, V. F. (2014). Effect of copper on the mechanical properties of alloys formed by powder metallurgy. *Materials & Design*, 58, 12-18.
- Yamanoglu, R., Bahador, A., & Kondoh, K. (2021). Effect of Mo addition on the mechanical and wear behavior of plasma rotating electrode process atomized Ti6Al4V alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 3203-3212.
- Yamanoglu, R., Bradbury, W., Karakulak, E., Olevsky, E. A., & German, R. M. (2014). Characterisation of nickel alloy powders processed by spark plasma sintering. *Powder Metallurgy*, 57(5), 380-386.
- Yamanoglu, R., Bradbury, W., Olevsky, E. A., & German, R. M. (2013). Sintering and microstructure characteristics of 42CrMo4 steel

processed by spark plasma sintering. *Metals and Materials International*, 19, 1029-1034.

Yamaoglu, R., & Olevsky, E. A. (2016). Consolidation of Al-nanoSiC composites by spark plasma sintering. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 4(2), 119-122.

Yamanoglu, R. (2015). In situ aluminum alloy coating on magnesium by hot pressing. *Acta Metallurgica Sinica. English Letters*, 28, 119-122.



## **BÖLÜM 4**

### **TOZ METALURJİSİNDE PARTİKÜL MORFOLOJİ KARAKTERİZASYONUNUN ÖNEMİ**

Prof. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU

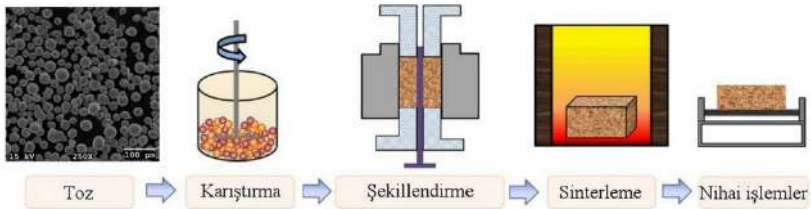
#### **GİRİŞ**

Endüstriyel uygulamalarda temel hedef ihtiyacın karşılanmasıdır. İhtiyaç kavramı çok değişkendir ve insanoğlunun ilk varoluşundan itibaren tanımı her gün değişmektedir. İnsanların ihtiyaçlarının karşılanması için teknoloji baş aktördür. Çünkü ihtiyacı karşılamayı sağlayan unsur söz konusu zamanda sahip olunan teknoloji seviyesidir (Grodal vd., 2023; Max-Neef 2017). İnsanoğlu teknolojinin en basit olduğu zamanlarda sadece ateşi kullanarak birçok ürün elde etmiş, bu sayede avlanma ve beslenme ihtiyaçlarını karşılayabilmiştir. Doğadaki mineraller şekillendirilmiş ve devamında ateş yoluyla sinterlenmiştir (Upadhyaya, 1997). Günümüzde talep edilen ihtiyaçlar çok gelişmiş teknoloji gerektirmektedir. Uçak motor parçaları, gözlük çerçeveleri, saatin içindeki küçük dişliler, cep telefonu parçaları ve daha birçok örnek önemli ihtiyaçlardır ve karşılanmaları için teknolojinin de sürekli gelişmesi gerekir (Zhang vd., 2018). Dolayısıyla ihtiyaç duyulan ürünlerin üretilmesi için gerekli teknolojinin ayrı bir önemi vardır. Bu çalışmada insanoğlunun varlığından günümüze kadar çok farklı ihtiyaçların karşılanmasında vazgeçilmez bir üretim teknolojisi olan toz metalurjisi ve kullanılan hammaddenin özellikleri incelenmiştir. Bir üretim yönteminin tümüyle ortaya konmasından ziyade üretim yöntemi

neticesinde ürünlerin kalitesine etki eden hammadde karakterizasyonu ön planda tutulmuştur.

## TOZ METALURJİSİ VE PARTİKÜL KARAKTERİZASYONU

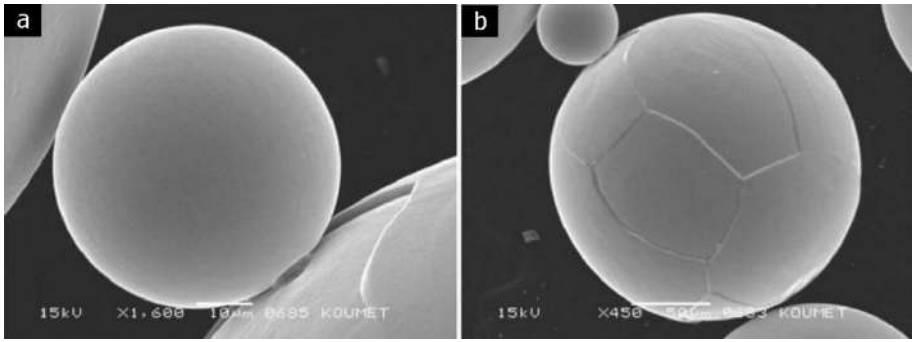
Bir malzeme üretim tekniği olarak toz metalurjisi partikülden yola çıkarak nihai ürüne uzanır. Her ne kadar 1 mm'nin altındaki boyutlar partikül niteliği taşısa da günümüzde farklı toz metalurjik uygulamalar için gerekli partiküllerin boyutları genellikle 150 mikrometreden daha küçüktür. Bu nedenle bu çalışmada da partikül kavramını 150 mikrometre altı olarak dikkate almaktayız (Angleo vd., 2018). Partiküller bir araya gelerek bir yığın oluşturur ve toz kavramı oluşur. Toz farklı uygulamalar için alaşımlama veya kompozit oluşturmak için önce karıştırma işlemine tabi tutulur, sonra şekillendirilir ve ardından sinterlenir (Yamanoglu & Olevsky, 2016). Diğer üretim tekniklerinde olduğu gibi üretim süreci sonrasında bitirme işlemlerine başvurmak genellikle gerekecektir. Tüm bu sıralamayı içeren toz metalurjik üretim sürecinin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Şekillendirme ve sinterleme süreçleri oldukça karmaşıktır ve nihai ürünün özelliklerine doğrudan etki ederler. Tozun özellikleri de şekillendirmeyi ve sinterlemeyi etkiler.



**Şekil 1.** Toz metalurjisinin genel akış şeması (Yang vd., 2022)



Her ne kadar tüm süreçlere etki eden en temel nokta toz kavramı da olsa tozu incelemeye partikülden başlamak gerekir. Partikül veya parçacık toz metalurjisinin hammaddesidir (Strondl vd., 2015). Partiküllerin bireysel özellikleri toz yığınının toplam özelliğini oluşturur. Her ne kadar toz incelenirken kütleli veya hacimsel bir toz miktarı üzerinden analizler yapılmasına rağmen karakterizasyonun ilk noktası partikülden geçmelidir. Şekil 2’de Ti6Al4V alaşımına ait partiküller verilmiştir. Her iki görüntüdeki partiküller aynı alaşıma ait olsa da tozların yüzeylerinin farklı karakteristik sergilediği net bir şekilde görülmektedir.



**Şekil 2.** Ti6Al4V alaşımına ait partiküllerin SEM görüntüleri  
(Yamanoglu vd., 2011)

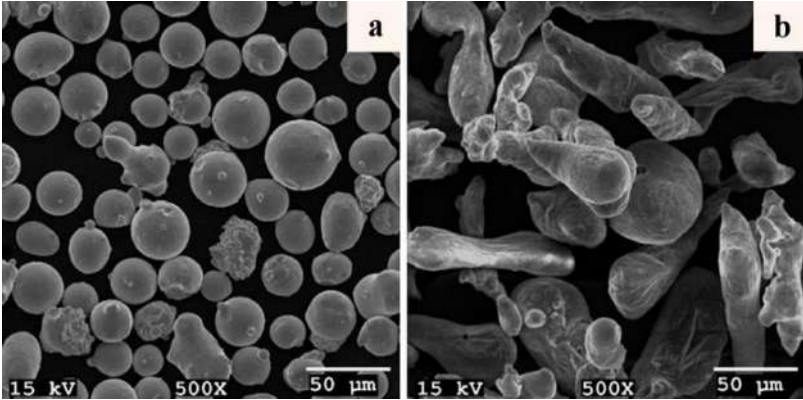
Tam bu noktada partikül kavramının farklı bir ifadesini ortaya koymak gerekir. Şekil 2’de de yer alan görüntüde partikül yüzeyinin pürüzsüz olduğu görülmektedir. Yaklaşık 60 µm boyuta sahip bu ince partikülün boyun oluşturduğu sağ altında yer alan kaba partikülün ise yüzeyinin etkili bir topografiye sahip olduğu dikkati çekmektedir. Toz metalurjisinin hammadde karakterizasyonu açısından bu morfolojik ayırım çok önemlidir. Bu tarz bir farklılık tozların katılacağı

sırasındaki metalurjik olaylar ile açıklanabilir (Yamanoglu vd., 2021). Her ne kadar büyük bir genelleme ile toz metalurjisi katı halde gerçekleşen reaksiyonlar ile nihai ürüne ulaşım birçok durumda diğer üretim yöntemlerine göre daha iyi bir performans sunsa da aslında yine bu katkının sebebi döküm ve hızlı katılaşmadır. Toz metalurjisinde tozlar çok farklı teknikler ile üretilmesine rağmen atomizasyon teknikleri yaygın bir şekilde tercih edilir (Başcı & Yamanoglu, 2019). Tozu elde edilecek malzeme ergitilir, yeterince aşırı ısıtılır, ardından ince bir sıvı demeti şeklinde akarken farklı etkenler ile parçalanır. Neticede yine bir ergitme ve katılaşma süreci hakimdir. Daha önce bu bölümün girişinde belirtilen partikül boyutları dikkate alındığında çok ince boyutlara sahip sıvı metalin katılaşması çok hızlı olacaktır. Hızlı katılaşmadan kastedilen soğuma hızları  $10^2$  ile  $10^8$  arasında olabilmektedir. Bu seviyede yüksek soğuma hızları bazen partiküllerin boyutları da ince ise amorf katılaşmaya sebep olabilir (Muratal vd., 2023). İşte bu açıklamanın neticesinden Şekil 2a'da yer alan toz yüzey morfolojisi hakim olur. Hızlı katılaşma neticesinde ortaya çıkan tek taneden oluşan partikül tek başına "tane" kavramını da hak edebilir. Buna rağmen Şekil 2b'de yer alan yaklaşık 200 mikron boyutundaki partikülün yüzeyinden çok taneli olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 2b, Şekil 2a'nın daha düşük büyütme görüntüsüdür). İnce partiküle göre nispeten daha yavaş soğuyan bu partikül amorf değil kristalin bir yapı oluşturacak şekilde katılaşmıştır. Çok taneden oluşan bu partiküller için tane kavramını kullanmak çok doğru olmayacaktır. Tek başına tane olarak ifade edilen partiküller aslında metalik cam olarak da

nitelendirilebilir. Bu kavramsal farklılıklar toz metalurjisi için oldukça önemlidir ve partikül karakterizasyonunun en başında yer almalıdır.

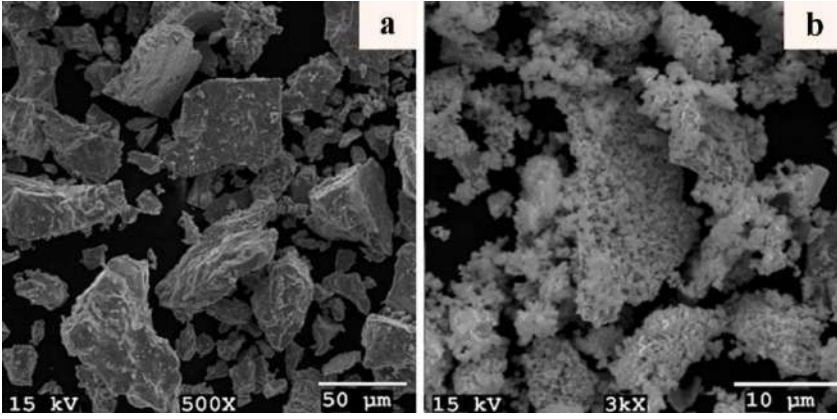
Toz metalurjisinde boyut kadar önemli bir diğer kavram şekildir. Özellikle geleneksel toz metalurjik prosesler ve günümüzde eklemeli imalat açısından üretim sürecinin bir zorunluluğu olarak partiküllerden küresel şekle sahip olmaları beklenir. Küreselin dışındaki tüm farklı şekil tanımları örneğin; pulsu, iğnemsisi, prizmatik, dentritik, süngerimsi, uzamış vb. gibi partiküllerin benzediği unsurlar neticesinde ortaya çıkan tanımlamalar nihayetinde düzensiz şekil olarak tanımlanır. Dolayısıyla küresel şekil ve düzensiz şekil olarak partiküller şekil yönünden tanımlanır. Partiküllerin şekilleri üretim yöntemi ile doğrudan ilişkilidir (Hlosta vd., 2016). Bu çalışmada özellikle metalik malzemeler hedef alındığından metal tozlarının partikülleri şekil yönünden incelenecektir. Şekil 3'te farklı yöntemlerle üretilmiş dolayısıyla farklı şekillere sahip toz partikülleri verilmiştir. Tamamen küresel bir toz örneği Şekil 2'de verilmişti. Küresel toz ihtiyacı söz konusu olduğunda metal tozları atomize edilmelidirler. Atomizasyon metalin ergitilmesi, yeterince aşırı ısıtılması ve nihayetinde farklı şekillerde pulverize edilmesidir. Sıvı metal çok ince damlacıklar haline getirilir ve damlacıklara katılaşmaları sırasında yeterince süre sağlanırsa partiküller Şekil 2'de görüldüğü gibi küresel formda katılaşır. Yeterli süre kriteri partiküllerin enerjilerini azaltmak için maksimum hacimlerini minimum yüzeyde toplamaları yani küresel formun oluşması için ortaya konmuştur (Callister & Rethwisch, 2018). Bu kritik detay tozların küresel forma sahip olmaları için gerekli sürenin neresinde kaldığına bağlı olarak farklı etki eder ve

partiküllerin şekli küresele yakın veya uzak oluşur. Şekil 3a’da bu duruma örnek bir toz görüntüsü verilmiştir. Bazı partiküllerin küresel bazılarının küresele yakın bazılarının da sadece yuvarlak hatlı olduğu görülmektedir. Partikül boyutu ve atomizasyonu sağlayan gaz veya mekanik etkinin bir fonksiyonu olarak yukarıda açıklanan sebeplerden dolayı bu tarz farklı şekiller ile karşılaşılır. Yine bir atomizasyon tekniği ile üretilmiş fakat küresellikle ilgili bir tanımın çok uzak olduğu bir toza örnek Şekil 3b’de yer almaktadır. Saf alüminyuma ait bu tozlar santrifuj atomizasyonu ile üretilmiştir. Sıvı metalin bir disk ile saçılması neticesinden damlavari ve uzamış fakat yine de yuvarlak hatlı partiküller elde edilmiştir. Her ne kadar küresel şekilden uzaklaşmış olunsada atomizasyonun doğasının bir sonucu olarak yani sıvı metalin katılaşmasının bir neticesi olarak tozlar en azından yuvarlak hatlı katılaşmaktadırlar (Li vd., 2023).



**Şekil 3.** a) CoCr alaşım tozu (gaz atomizasyonu) ve b) alüminyum tozu (santrifuj atomizasyonu)

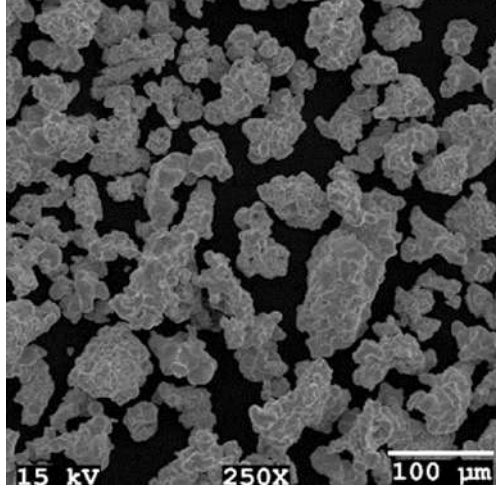
Şekil 4a ve b’de atomizasyonun dışında mekanik ve kimyasal tekniklerle üretilmiş toz örnekleri yer almaktadır. Mekanik yöntemler ile toz üretimi neticesinden Şekil 4a’dekine benzer şekilde mekanik etkileri yansıtan köşeli bir yapı elde edilirken (Pradeep vd., 2022) kimyasal reaksiyonların sonucunda Şekil 4b’deki gibi ince partiküllerin topaklanmış bir görüntüsünü veya farklı şekillerde dentritik yapılar oluşabilir (Dong vd., 2020).



**Şekil 4.** a) Ti tozu (HDH + mekanik) ve b) W tozu (kimyasal)

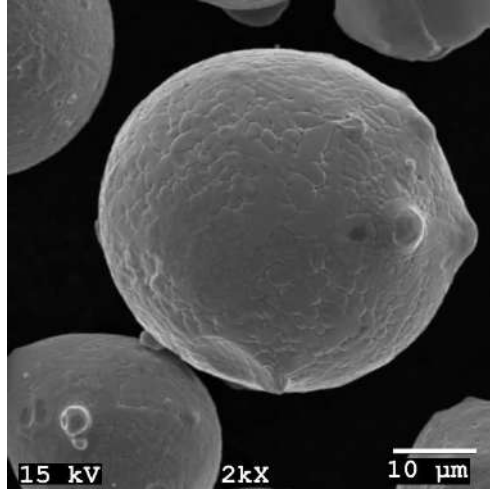
Bazı atomizasyon teknikleri yukarıda belirtilen ve Şekil 2 ve 3’te gösterilen morfolojiden tamamen farklı olabilir. Oluşum mekanizması yine katılma hızı ile açıklanabilen bir durumun sonucunda tozlar çok fazla girinti çıkıntılıdan oluşan topografik fakat yine keskin köşe içermeyen tarzda olabilir. Şekil 5’te bu duruma örnek olarak Cu tozuna ait SEM görüntüsü sunulmuştur. Atomizasyon yönteminde sıvı metalin parçalanmasında su kullanıldığında damlacıklar çok hızlı katılaştıklarından küreselleşmek için süre yetmez. Böyle hızlı katılma

olması durumunda tozlar agregat morfolojisine benzeyen bir şekil sunarlar.



Şekil 5. Su atomizasyonu ile üretilen Cu tozu

Tozların yüzey özellikleri de karakterizasyon açısından oldukça önemlidir. Tozlar üretimleri sürecinde ortam koşullarından etkilenebilirler. Boyutları çok küçük parçacıklar söz konusu olduğundan enerjileri yüksektir ve bu enerjilerini düşürmek isterler. Bu nedenle tozlar çok rahat oksitlenir. Oksitlenme tozların yüzeylerinde kolayca fark edilebilir. Oksitlenmiş bir tozda yüzey kalitesi çok düşüktür ve mikroyapısal unsurlar ayırt edilemez (Ahmed vd., 2016). Eğer partiküllerin yüzeyinde mikroyapı ayırt edilebiliyorsa tozların temiz olduğu söylenebilir. Fakat yine de kantitatif analiz teknikleri ile oksijen, azot ve hidrojen içeriklerinin belirlenmesi eğer uygulama alanı kritik ise tercih edilmelidir. Şekil 6’da gaz atomizasyonu ile üretilmiş CoCr alaşım tozunun SEM görüntüsü verilmiştir. Partikülün yüzeyinden mikroyapısı net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 6. Gaz atomizasyonu ile üretilmiş Cu tozu

## SONUÇ

Toz metalurjisinde partikül karakterizasyonu yukarıda belirtilen şekilde sadece şekil üzerinden yapılamaz. Şekil kadar boyut, boyut dağılımı ve saflıkta önemlidir. Fakat her birinin etkisi çok farklı değerlendirilmelidir. Toz şekli açısından küresel form tercih edilir. Küresel form geleneksel toz metalurjik yöntemlerde tozun kalıba hızlı dolması için gereklidir. Eklemeli imalatta ise toz yataklı sistemlerde tozun iyi bir şekilde katman katman serilmesi için önemlidir. Bu nedenle toz şekli toz metalurjisi açısından oldukça önemlidir. Her ne kadar küresel toz tercih sebebi olsa da birçok toz metalurjik süreçte küresel şekil tercih etmek gereksiz olabilir. Tozların akıcılık özelliklerinin gerekli olmadığı üretim süreçlerinde tozlar düzensiz şekilli olabilir. Örneğin basınç destekli sinterleme yöntemlerinde sıcaklık ile basınç eş zamanlı uygulandığından partiküllerin küresel olması çok zorunlu bir tercih değildir (Yamanoglu vd., 2013). Ayrıca

küresel şekilli tozlar genellikle atomizasyon yöntemi ile üretilir ve atomizasyon teknikleri diğer tekniklere göre daha pahalı olabilir. Ayrıca bu teknikler daha da risklidir. Risk hem çalışanlar hem de söz konusu malzeme açısından da geçerlidir. Bu nedenle eğer tozların şekli birinci tercih değilse maliyet ve güvenlik nedeni olarak diğer toz üretim teknikleri ile üretilen tozlar tercih edilebilir. Bu çalışmada genel olarak toz şekli ve yüzey özellikleri incelenmiştir. Farklı tekniklerin partikül şekli üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Özellikle atomizasyon tekniklerinde elde edilen yuvarlak hatlı morfolojilere dikkat çekilmiştir.

## **TEŞEKKÜR**

Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje No: FBA-2024-3627).



## KAYNAKÇA

- Ahmed, M. A., Daoush, W. M., & El-Nikhaily, A. E. (2016). Fabrication and characterization of copper/silicon nitride composites. *Advances in materials Research*, 5(3), 131.
- Angelo, P. C., Subramanian, R., & Ravisankar, B. (2022). *Powder metallurgy: science, technology and applications*. PHI Learning Pvt. Ltd.
- Başcı, U. G., & Ymanoğlu, R. (2019). Eklemeli metal imalat teknolojileri için metal tozu üretim yöntemleri. *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, 219-227.
- Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: an introduction*. John Wiley & Sons.
- Dong, Z., Liu, N., Hu, W., Ma, Z., Li, C., Liu, C., ... & Liu, Y. (2020). Controlled synthesis of high-quality W-Y2O3 composite powder precursor by ascertaining the synthesis mechanism behind the wet chemical method. *Journal of Materials Science & Technology*, 36, 118-127.
- Grodal, S., Krabbe, A. D., & Chang-Zunino, M. (2023). The evolution of technology. *Academy of management annals*, 17(1), 141-180.
- Hlosta, J., Žurovec, D., Jezerská, L., Zegzulka, J., & Nečas, J. (2016, May). Effect of particle shape and size on the compressibility and bulk properties of powders in powder metallurgy. In *Met. 2016–25th Anniv. Int. Conf. Metall. Mater. Conf. Proc* (pp. 1394-1399).
- Li, L., Peng, L., & Zhao, W. (2023). Effects of process parameters on the spreading morphology of disc surface and aluminium

- powder produced by centrifugal atomisation. *Powder Metallurgy*, 66(5), 509-518.
- Max-Neef, M. (2017). Development and human needs. In *Development ethics* (pp. 169-186). Routledge.
- Muratal, O., Yamanoğlu, R., Avcu, E., Gökalp, İ., Yavuz, H. İ., Gönülalan, Y., Kurban, M. E. & Bayram, E. Babbit tozunun gaz atomizasyonu ile üretimi ve saf demirin aşınma özelliklerine etkisi. *Bidge Yayınları*, 633-644.
- Pradeep, N. B., Hegde, M. R., Patel, G. M., Giasin, K., Pimenov, D. Y., & Wojciechowski, S. (2022). Synthesis and characterization of mechanically alloyed nanostructured ternary titanium based alloy for bio-medical applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 88-101.
- Strondl, A., Lyckfeldt, O., Brodin, H., & Ackelid, U. (2015). Characterization and control of powder properties for additive manufacturing. *JOM*, 67, 549-554.
- Upadhyaya, G. S. (1997). *Powder metallurgy technology*. Cambridge Int Science Publishing.
- Yamanoglu, R., Bahador, A., & Kondoh, K. (2021). Effect of Mo addition on the mechanical and wear behavior of plasma rotating electrode process atomized Ti6Al4V alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 3203-3212.
- Yamanoglu, R., Bradbury, W., Olevsky, E. A., & German, R. M. (2013). Sintering and microstructure characteristics of 42CrMo4 steel processed by spark plasma sintering. *Metals and Materials International*, 19, 1029-1034.

- Yamanoglu, R., German, R. M., Karagoz, S., Bradbury, W. L., Zeren, M., Li, W., & Olevsky, E. A. (2011). Microstructural investigation of as cast and PREP atomised Ti–6Al–4V alloy. *Powder metallurgy*, 54(5), 604-607.
- Yamaoglu, R., & Olevsky, E. A. (2016). Consolidation of Al-nanoSiC composites by spark plasma sintering. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 4(2), 119-122.
- Yang, H., Chen, X., Huang, G., Song, J., She, J., Tan, J., ... & Pan, F. (2022). Microstructures and mechanical properties of titanium-reinforced magnesium matrix composites: review and perspective. *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(9), 2311-2333.
- Zhang, G., McAdams, D. A., Shankar, V., & Mohammadi Darani, M. (2018). Technology evolution prediction using Lotka–Volterra equations. *Journal of Mechanical Design*, 140(6), 061101.



## **BÖLÜM 5**

### **DENİZALTI BORU HATLARININ GENİŞ ÇAP, KALINLIK ARALIĞINDA DİNAMİK DAVRANIŞ PARAMETRELERİNİN TAHMİNİ**

Dr. Öğr. Üyesi Begüm Yurdanur Dağlı

#### **GİRİŞ**

Denizaltı boru hatları, petrol ve gaz endüstrisinde kritik bir taşıma aracı olarak öne çıkmaktadır. Bu yapıların tasarımı, proje ömrü boyunca kararlılık ve güvenilirliğin sağlanması amacıyla büyük bir titizlikle ele alınmaktadır (Cevik ve Yüksel, 1999; Guo, Song ve Ghalambor, 2013). Boru hatlarının tasarımında temel kriterler; çevresel yükler, suyun fiziksel özellikleri, boru hattının çapı, kalınlığı ve malzeme özellikleridir (El-Reedy, 2019). Çevresel yüklerin en büyük bileşenini oluşturan dalga kuvvetleri, deniz yapıları için önemli bir mühendislik sorunu teşkil etmektedir (Eicher, Guan, Jeng, 2003). [4]. Özellikle sığ sularda bulunan ince cidarlı ve büyük çaplı boru hatlarının stabilitesinin sağlanabilmesi için çevresel koşulların titizlikle analiz edilmesi gerekmektedir (Xu, Pang, Yan, Zhai, Kang, Zhang, 2022). Hidrodinamik süreçler ve boru hattının gerilme davranışı, su derinliğine bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Dalga formunu tanımlayan temel parametreler olan su derinliği ( $d$ ), dalga yüksekliği ( $H$ ) ve dalga periyodu ( $T$ ) değiştikçe geçerli dalga teorileri de farklılık göstermektedir. Bu nedenle, tasarım sürecinde dalga koşullarının

detaylı bir şekilde incelenmesi, boru hattı güvenliği açısından büyük önem taşır.

Farklı dalga teorilerinin geçerlilik sınırları içinde hesaplanan hidrodinamik kuvvetlerin boru hattına etkisi de farklıdır. Yanal hidrodinamik kuvvetini ( $F_H$ ) oluşturan sürükleme ( $F_D$ ) ve atalet ( $F_I$ ) kuvvetlerinden hangisinin daha baskın olduğu hidrodinamik özelliklere göre belirlenmektedir. Son yıllarda birçok araştırmacı, çeşitli dalga koşulları altında denizaltı boru hatlarının stabilite analizlerini farklı tasarım yöntemleri kullanarak incelemektedir. Gong ve arkadaşları (Gong, Lam, Lu, 2000), deniz suyu ile boru hattı arasındaki sıvı-yapı etkileşimini, Güçlü Asimptotik Yaklaşım temelli güvenlik değerlendirmesi için incelemiştir. Yang ve Wang (Yang ve Wang, 2013), sonlu eleman yöntemi kullanarak boru hattının kararlılık problemi için sayısal bir model oluşturmuş ve çözmüştür. Karampour ve arkadaşları (Karampour, Albermani, Gross, 2013), başlangıç kusurlarını dikkate alarak denizaltı boru hatlarının yanal burulmasını analitik ve sayısal yöntemler kullanarak incelemiştir. Chen ve arkadaşları (Chen, Liu, Li, Chen, Jeng, Liao, Yu, 2020), dalga-taban etkileşimini incelemek için entegre bir Sonlu Elemanlar Yöntemi modeli önermiştir. Hafez ve arkadaşları (Hafez, Abdelsalam, Abdelhameed, 2022), Flexcom yazılımını kullanarak boru hattının dinamik taban kararlılığı analizini gerçekleştirmiştir.

Denizaltı boru hatlarının kararlılık analizinde analitik ve sayısal yöntemlerin karmaşıklığı, araştırmacıları alternatif yaklaşımlar geliştirmeye yönlendirmiştir (Gökkuş, Dağlı, Yıldırım, 2017). Bu çerçevede, istatistiksel teknikler uygun bir çözüm sunar. Squillante ve

arkadaşları (Squillante, Kaeli, Sinha, 1997), iş yükü ve boru hattı performansını değerlendirmek için matematiksel modeller oluşturmuş; Chu ve Chen ise uzun mesafeli boru hatlarının tasarımında grafik teorisini kullanarak optimizasyon sağlamıştır (Chu, Chen, 2012). Youssef ve arkadaşları (Youssef, Cassidy, Tian, 2013), açık deniz boru hatlarının taban kararlılığını modellemek için istatistiksel bir yöntem tercih etmiş; Zhang ve arkadaşları ise havacılık hidrolik boru sistemlerinde olasılıksız duyarlılık analizi kullanarak tasarım geliştirme çalışmalarında bulunmuştur (Zhang, Zhou, Wang, Yue, 2019). Bu araştırmalar, istatistiksel analizlerin boru hattı tasarımlarında performans iyileştirme ve maliyet etkinliği sağlama potansiyelini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma ise birçok alanda karmaşık karar problemleri için en yaygın olarak kullanılan regresyon modellerini sunmaktadır. Bu modeller, boru hattı tasarım parametreleri ile stabilite kriterleri arasındaki genel eğilimleri göstermek için kullanılmıştır. Hidrodinamik dalga kuvvetleri, Stokes 2. Mertebe Dalga Teorisi kullanılarak elde edilmiştir. Le Méhauté'nin diyagramı, normalize edilmiş dalga yüksekliği  $H$  ve su derinliği  $d$  değerlerine göre su dalgalarının uygulanabilirlik teorilerini belirlemek için kullanılmıştır (Ducrozet, Bouscasse, Gouin, Ferrant, Bonnefoy, 2019). Morison denklemi kullanılarak hidrodinamik sürüklenme kuvveti ( $F_D$ ) ve atalet kuvveti ( $F_M$ ) hesaplanmıştır. Boru ile deniz tabanı arasındaki boşluk oranının boru çapına oranının 1,0'dan büyük olması dikkate alındığından, hidrodinamik kaldırma kuvveti ( $F_L$ ) ihmal edilmiştir (Sarpkaya, 1981). Basit destekli çelik boru hattının titreşim ve kararlılığı, yanal

hidrodinamik kuvvetlerin ( $F_H$ ) etkisi altında analiz edilmiştir. Bu amaçla boru hattının dinamik davranışı, bilgisayar destekli Zaman Geçmiş Analizleri kullanılarak Newmark  $\beta$  yöntemi ile modellenmiştir. Boru et kalınlığı 10 ile 30 mm, dış çapı ise 500 ile 1000 mm arasında değişmektedir. İlk üç doğal frekans, maksimum gerilme ve yer değiştirme değerleri, 18 boru modeli için değişkenler arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla bir veri seti oluşturulmuştur.

Çoklu Regresyon tekniği, boru hattı performansını etkileyen geometrik özelliklerdeki belirsizlikleri göz önünde bulundurarak güvenilirlik ölçütlerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Tam kuadratik modeller oluşturularak daha verimli ve özlu matematiksel temsiller elde edilmiştir. Regresyon yöntemlerinin değerlendirilmesi, Ortalama Kare Hata (MSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Belirleme Katsayısı ( $R^2$ ) dahil olmak üzere çeşitli ölçütlere dayanılarak gerçekleştirilmiştir.

## **1. Amaç ve Yöntem**

Bu çalışmanın amacı, önerilen yöntemin genel kapsamını göstermek ve genel eğilimleri ortaya koymaktır. denizaltı boru hatlarının dalga kuvvetlerine maruz kaldığında meydana gelen dinamik tepkilerini tahmin etmek için 2D bir yapısal model kullanılmıştır. Analizde çevresel yükler olarak uygulanan dalga kuvvetleri, Stokes 2. Mertebe Dalga Teorisi kullanılarak türetilmiştir. Regresyon analizi için bir veri seti oluşturmak amacıyla doğal titreşim frekansları, maksimum gerilme ve maksimum yer değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Çoklu Regresyon modeli, dört grup giriş parametresi ile beş grup çıkış parametresi arasındaki ilişkileri anlamak ve yeni giriş değerleriyle



tahminlerde bulunmak amacıyla uygulanmıştır. Her bir durumda, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiler, toplamda 144 giriş değeri kullanılarak tahmin edilmiştir. Tam kuadratik denklemler için performans ölçütlerinin değerlendirilmesi, denizaltı boru hatlarının geometrik özellikleri ve hidrodinamik kuvvetlerin etkisi göz önünde bulundurulduğunda, regresyon analizlerinin tahminler için etkili olduğunu göstermiştir.

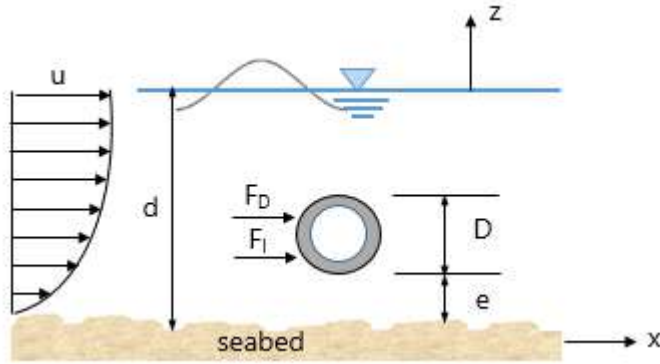
### 1.1. Denizaltı Boru Hattı Tasarımı

Denizaltı boru hattının tasarımı, dikkatli mühendislik değerlendirmeleri ve ayrıntılara titizlikle odaklanmayı gerektiren oldukça karmaşık bir görevdir. Çap ve kalınlık, denizaltı boru hatlarının kararlılığını önemli ölçüde etkileyen temel tasarım parametreleridir. Bir denizaltı boru hattının çapı, doğrudan yapısal bütünlüğünü ve kararlılığını etkiler. Bu çalışma, boru hattının çap ve cidar kalınlığındaki değişimlerin doğal titreşim frekansı, maksimum gerilme ve maksimum yer değiştirme üzerindeki etkilerini matematiksel ilişkiler yoluyla araştırmayı amaçlamıştır. Bu amaçla 18 model analiz edilmiştir. Boru hattı modellerinin tasarım parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1. Boru Hattı Modellerinin Tasarım Özellikleri**

<b>Model</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>	<b>P8</b>	<b>P9</b>
<b>D (mm)</b>	500	500	500	600	600	600	700	700	700
<b>t<sub>w</sub> (mm)</b>	10	20	30	10	20	30	10	20	30
<b>Model</b>	<b>P10</b>	<b>P11</b>	<b>P12</b>	<b>P13</b>	<b>P14</b>	<b>P15</b>	<b>P16</b>	<b>P17</b>	<b>P18</b>
<b>D (mm)</b>	800	800	800	900	900	900	1000	1000	1000
<b>t<sub>w</sub> (mm)</b>	10	20	30	10	20	30	10	20	30

Askıdaki boru hattının konfigürasyonu, Gücüyen (2015) tarafından kullanılan tasarıma benzer şekilde seçilmiş olup, 10 m açıklığa sahip ve homojen bir malzemeden oluşmaktadır (Şekil 1)



**Şekil 1. Boru Hattı Modeli**

Boru hattının iki ucu tespit kitleleri ile deniz tabanına sabitlenmiş olup malzeme olarak yapısal çelik kullanılmıştır. Malzemeye ait özellikler, Young modülü  $21 \times 10^7$  kN/m<sup>2</sup>, Poisson oranı 0,3 ve yoğunluk 78,50 kN/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir.

### **1.2. Hidrodinamik Yükler**

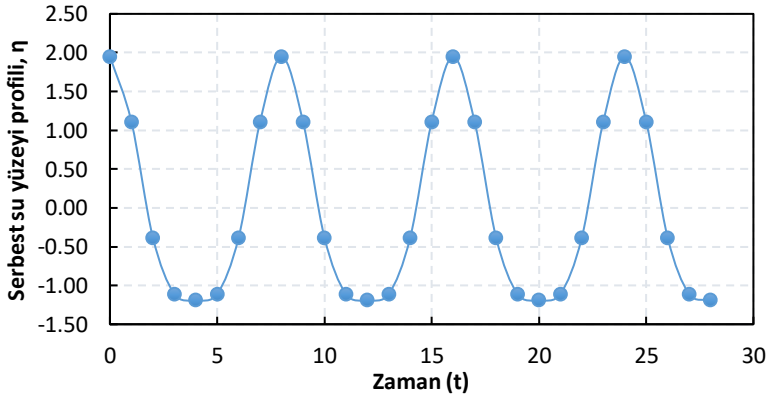
Bu süreç, çevresel koşulların kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini içerir ve hidrodinamik yüklerin belirlenmesi amaçlanır. Su derinliği ( $d$ ), dalga yüksekliği ( $H$ ), dalga periyodu ( $T$ ) gibi temel faktörler, uygun dalga teorisinin belirlenmesinde kullanılır (Bai ve Yong, 2014). Uygulanan parametreler  $d = 10,00$  m,  $T = 8,00$  s,  $H = 3,14$  m olup, bu değerler Stokes 2. Mertebe Dalga Teorisi için geçerlilik kriterleri olarak kabul edilmiştir. Bu teori, su derinliği dalga boyuna ( $L$ ) göre çok sığ olmadığından dalga davranışını daha iyi tahmin edebilmektedir (Stokes, 1847). Bağıl su derinliği (su derinliği/dalga

boyu,  $d/L$  0,005 ile 0,05 arasında alındığından bu dalgalar orta derinlik dalgaları olarak sınıflandırılır (Chakrabarti, 2005) Dalga yüklerinin hesabında kullanılan akışkan partikülünün hız ( $u$ ) ve ivmelerine ( $\dot{u}$ ) ilişkin bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$u = \frac{HgT}{2L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L}\right)^2 c \frac{\cosh[4\pi(z+d)/L]}{\sinh^4(2\pi d/L)} \cos\left(\frac{4\pi}{L}x - \frac{4\pi}{T}t\right) \quad (1)$$

$$\dot{u} = \frac{2\pi^2 H}{T} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)} \sin\left(\frac{4\pi}{L}x - \frac{4\pi}{T}t\right) + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh[4\pi(z+d)/L]}{\sinh^4(2\pi d/L)} \sin\left(\frac{8\pi}{L}x - \frac{8\pi}{T}t\right) \quad (2)$$

Bağıntılarda geçen  $z$ -ekseni, durgun su seviyesinden yukarıya doğru dikey,  $x$ -ekseni ise dalgaların yayılma yönüne paraleldir. Dalga oluşumu sürecinde serbest su yüzü profili ( $\eta$ ), potansiyel akış yaklaşımına dayalı olarak elde edilmiştir ve Şekil 2'de gösterilmektedir.



**Şekil 2. Stokes 2. Mertebe Dalga Teorisi ile Belirlenen Serbest Su Yüzeyi Profili**

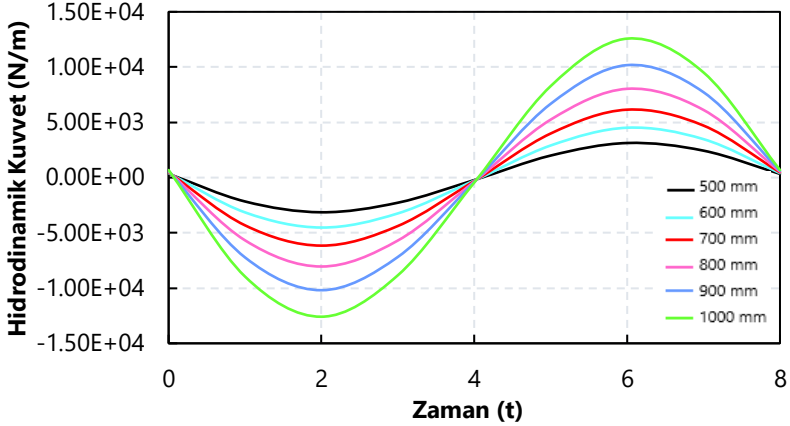
Akışkan için seçilen deniz suyuna ait tuzlu su yoğunluğu ( $\rho$ ) 1025 kg/m<sup>3</sup> ve dinamik viskozitesi ( $\mu$ ) 0,0015 Ns/m<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Dalga boyu ( $L$ ), dalga parametreleri dikkate alınarak yaklaşık 70,90 m olarak hesaplanmıştır. Boru hattı üzerindeki hidrodinamik yükler, hareket eden akışkanın uyguladığı kuvvetler olup, Morison Denklemi kullanılarak belirlenir. Hidrodinamik atalet kuvveti ( $F_I$ ) ve sürüklenme kuvveti ( $F_D$ ) bileşenlerinden oluşan toplam yanal kuvvet ( $F_H$ ), z eksenini boyunca Denklem (3) ile elde edilir:

$$F_H = F_D + F_I = \int_{-d}^{\eta} \frac{1}{2} \rho C_D D u_{(z,t)} |u_{(z,t)}| dz + \int_{-d}^{\eta} \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \dot{u}_{(z,t)} dz \quad (3)$$

Burada, D boru çapını temsil eder. Denklem (3)'te görüldüğü üzere, sürüklenme kuvveti katsayısı ( $C_D$ ) ve atalet kuvveti katsayısının ( $C_M$ ) belirlenmesi gereklidir. Çalışma kapsamında, bilinmeyen katsayılar sırasıyla 2,0 ve 0,7 olarak kabul edilmiştir (Zan ve Lin 2020). Boru hattı üzerindeki sürüklenme kuvveti, akışkanın boru yüzeyinden akarken karşılaştığı sürtünme direncinin bir sonucudur. Atalet kuvveti ise boru etrafındaki akışkanın hızlanma veya yavaşlamasından kaynaklanır (Cengel ve Cimbala, 2013).

Bu çalışmada, boru ile deniz tabanı arasındaki boşluk oranı ( $e/D$ ) yaklaşık 1,2 olarak kabul edilmiştir.  $e/D > 1$  olduğunda kaldırma kuvvetinin ( $F_L$ ) önemi, aksenal kuvvetlere kıyasla ortadan kalkar. Bu, çapraz akış titreşimlerinin öneminin azaldığı ve aksenal titreşimlerin boru davranışını domine ettiği anlamına gelmektedir (Ahmadian, 2015).

Boru hattı üzerindeki hidrodinamik kuvvetlerin boru çapına bağlı olarak değişimi Şekil 3'te verilmiştir.



**Şekil 3. Zamanla Değişen Hidrodinamik Kuvvetler**

Dalganın tepe noktasında, maksimum yatay parçacık hızı, atalet kuvvetinin artmasına neden olmaktadır. Buna karşılık, yatay ivmenin sıfır olması, sürüklenme kuvvetinin ortadan kalkmasına yol açar.

### **1.3. Denizaltı Boru Hattının Dinamik Davranışı**

Denizaltı boru hatlarının dinamik davranışı, Newmark  $\beta$  tabanlı bilgisayar destekli Time History analizi kullanılarak incelenmiştir (SAP 2000 Inc, 2000) Time History analizleri, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan yapısal dinamik tepki ile sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan yüklemeleri sağlar. Çözümün doğruluğu, adım aralığının ( $\Delta t$ ) uzunluğuna bağlıdır. Yük zaman geçmişi, tepki zaman geçmişi ve birçok durumda en kısa doğal periyotların iyi tanımlanabilmesi için yeterince kısa olmalıdır (Silwal, 2013). Zamanla değişen hidrodinamik kuvvetler (Şekil 3), zaman geçmişi fonksiyonları olarak atanmış ve bu çalışmada Newmark  $\beta$  yöntemi, implicit zaman adımı dikkate alınarak

kullanılmıştır. Temel alınan Taylor serisi açılımı Denklem (4)'te verilmiştir (Barltrop ve Adams, 1991).

$$\begin{aligned}
 Y_{t+1} = & \left[ \frac{m}{\Delta t^2} + \frac{c}{2\Delta t} + \beta k \right]^{-1} x \\
 & x \left\{ \beta F_{t+1} + (1-2\beta) F_t + \beta F_{t-1} \dots - 2 \right. \\
 & x \left[ \left( \frac{1}{2} - \beta \right) k - \frac{m}{\Delta t^2} \right] Y_t \\
 & \left. + \left[ -\frac{m}{\Delta t^2} + \frac{c}{2\Delta t} - \beta k \right] Y_{t-\Delta t} \right\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Yer değiştirme, doğal frekans ve gerilme değerleri, 144 giriş-çıkış veri çiftinden oluşan bir veri seti kullanılarak 18 farklı analiz sonucunda elde edilmiştir. Analiz, 0,01 saniyelik adım aralığı ve 0,5  $\beta$  değeri kullanılarak 30 saniyelik bir süre boyunca gerçekleştirilmiştir.

#### 1.4. İstatistiksel Modelleme Yaklaşımları

Literatürde de belirtildiği gibi regresyon, sayısal özelliklerin tahmin edilmesi veya öğrenilmesi ile ilgili istatistiksel yöntemlerden biridir (Uysal ve Güvenir, 1999). Regresyon modellemesi, deniz taşımacılığı alanında etkili sonuçlar ortaya koyduğu için çeşitli mühendislik uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır (Ni, Mangalathu, Liu, 2020; Seghier, Keshtegar, Tee, Zayed, Abbassi, & Trung, 2020; Banik, Paul, Rathore ve Jhaveri, 2024).

Bu çalışmada, ilk üç doğal frekans ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ), maksimum gerilme ( $\sigma_{\max}$ ) ve maksimum yer değiştirme ( $w_{\max}$ ), 4 giriş ve 5 çıkış parametresi ile 18 boru modeli arasındaki ilişkileri incelemek amacıyla veri seti oluşturmak için kullanılmıştır. En iyi çözümü bulmak amacıyla Çoklu Regresyon (MR) yönteminden yararlanılmıştır. Çoklu

Regresyon, aynı anda birden fazla bağımsız değişken ile bağımlı değişken arasındaki nedensel ilişkiyi matematiksel denklemler aracılığıyla araştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Efendi, Nawi, Deris ve Burney, 2023). Her bağımsız değişkenin, diğer değişkenler sabit tutulduğunda, bağımlı değişkenin tahminine yaptığı katkıyı temsil eden bir katsayısı vardır. Algoritma, denklemdeki katsayıları, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki kare farklarının toplamını en aza indirecek şekilde hesaplar (Harle, 2024). Bağımsız değişken sayısı "m" olan çoklu regresyonun genel matematiksel formu şu şekilde ifade edilir (Fernandes, Fonseca, Pacheco ve Fernandes, 2023):

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^m (\beta_j x_j) + \varepsilon \quad (5)$$

Burada,  $y$  bağımlı değişkeni temsil eder,  $x_j$  bağımsız bir değişkendir,  $\beta_j$  her regresörle ilişkilendirilen regresyon katsayısını temsil eder,  $\beta_0$  sabit terimi ifade eder ve  $\varepsilon$  rastgele hata terimini belirtir. Girişler ve çıkışlar arasındaki ilişki, Tam Kuadratik model kullanılarak matematiksel denklemlerle tanımlanır. Tam Kuadratik modeller, yalnızca doğrusal terimleri değil, aynı zamanda kuadratik terimleri de içerir ve daha etkili ve özlü matematiksel denklemler oluşturmak amacıyla geliştirilmiştir (Bethea ve Rhinehart, 2019).

Giriş parametrelerinin ( $D$ ,  $t_w$ ,  $F_H$ ,  $t$ ), çıktı üzerindeki etkisinin büyüklüğü ( $w_{\max}$ ,  $\sigma_{\max}$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ) Varyans Analizi (ANOVA) kullanılarak belirlenmiştir. Farklı algoritmalarla eğitilmiş regresyon modellerinin tahmin doğruluğu, Ortalama Mutlak Hata (MAE), Ortalama Kare Hata (MSE) ve Belirleme Katsayısı ( $R^2$ ) gibi performans

ölçütleri ile incelenmiştir. MAE, tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki ortalama farkı değerlendirir ve tüm hataları eşit olarak ele alır. Bu durum, büyük hataların istenmediği senaryolarda avantaj sağlar (Dagli, Ergut, Turan, 2023). MSE, tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki farkların karelerinin ortalaması alınarak hesaplanır. Daha düşük MSE değerleri, algoritmanın daha iyi performans gösterdiğini ifade eder; ancak, bu metrik uç değerlere duyarlıdır (Banik vd., 2024).  $R^2$ , bir modelin verilerini ne kadar iyi uyum sağladığını ölçer ve ölçülen değişkendeki varyansları sunar. Bu ölçek, 0'dan (açıklayıcı gücü yok) 1'e (mükemmel uyum) kadar değişir.

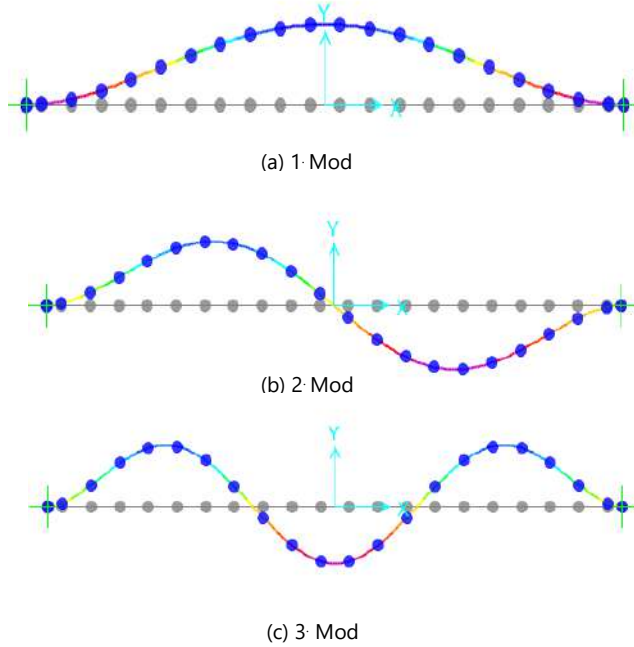
## **2. Sayısal Sonuçlar**

### **2.1. Doğal Titreşim Frekansları**

Boru hatlarının tasarlanan aralıklarda desteklenmesi, dalgaların etkisi altında kendi eksenlerine dik yönde salınımlar yapan boru gruplarından oluşan bir yapısal sistem oluşturur. Bu sistemin karakteristik parametrelerine bağlı olarak hesaplanan doğal titreşim frekansının, dalga-akış etkileşiminden kaynaklanan frekans ile çakışması, uyumlu veya uyumsuz salınımlara neden olmaktadır. Sonuç olarak, borular yorgunluk etkileri nedeniyle daha hızlı deforme olurlar (Sharifi ve Tasdighi, 2019). Boru hattı sisteminin dinamik performansı, bir veya daha fazla doğal titreşim frekansı belirlenerek tanımlanabilir (Liu, Wang, Zhou, Qu, Yu, Wei, Lu 2018), Yüksek frekanslı modlar, düşük frekanslı modlarda gözlemlenen yavaş zayıflamaya kıyasla, daha hızlı bir genlik azalması sergiler. Baskın davranış, düşük frekanslı modlar tarafından oluşturulur (Hou ve Xia, 2021). Bu nedenle, bu çalışmada borunun ilk üç mod için doğal titreşim frekansları



hesaplanmıştır. Analiz, tek açıklıklı ve basit mesne tile desteklenmiş uçlara sahip bir boru hattı için Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Borunun x ekseni, uzun boyut boyunca tanımlanmış olup, borunun bu eksene dik yöndeki titreşimleri hesaplanmıştır. Şekil 4, borunun ilk üç mod yapısını göstermektedir.



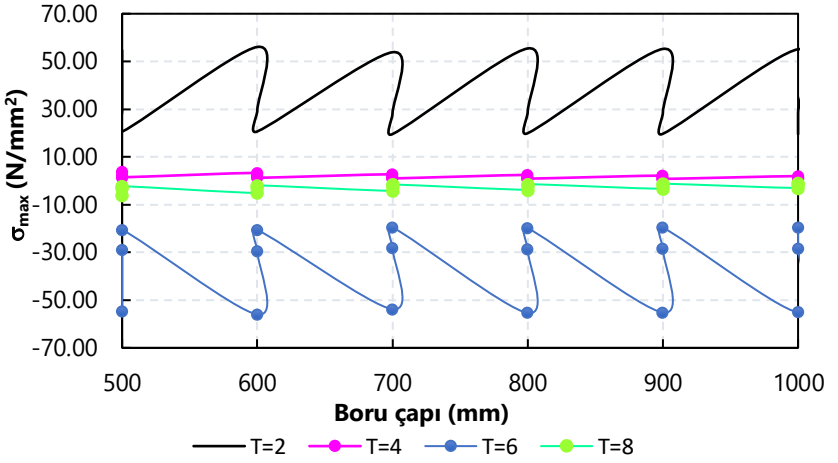
#### Şekil 4. İlk Üç Mod Şekli

Boru içerisindeki iç akış dikkate alınmadığında, boru çapı arttıkça doğal titreşim frekansı değerlerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, her çap için değişen et kalınlıkları frekansı etkilemektedir. Et kalınlığı arttıkça, aynı çap için frekans değerleri düşmektedir. Doğal titreşim frekansının en yüksek değeri, 1000 mm çap ve 10 mm et kalınlığında gözlemlenmiştir.

## 2.2. Boru Hattı Modellerinin Maksimum Gerilmeleri

Maksimum gerilme ve yer değiştirme değerlerini içeren bir veri seti, 18 boru modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Bu gerilme değerleri, maksimum yer değiştirmenin meydana geldiği kesitte gözlemlenen en önemli gerilmeleri temsil etmektedir.

Hidrodinamik kuvvetler, dalga periyodu boyunca sıvı parçacıklarının yn değiştirmesiyle dalgalanır ve boru hattının kesitinde pozitif (+) ve negatif (-) olmak üzere çeşitli etkilerle hesaplanan gerilmelere neden olur. Şekil 5'te gerilme değerlerindeki değişim seçilen çaplara bağlı olarak verilmiştir.

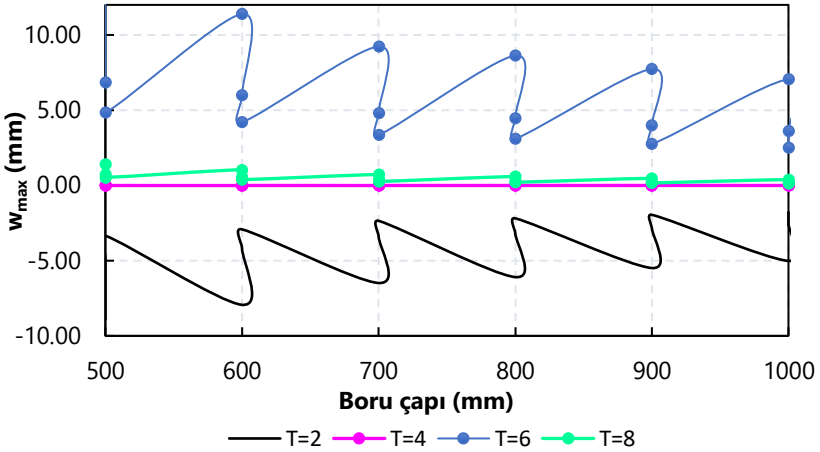


**Şekil 5. Maksimum Gerilme Değerlerinin Karşılaştırılması**

Şekilde görüldüğü gibi,  $t=T/2$ ,  $T/4$ ,  $3T/4$  ve  $T$  anlarında elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Boru hattında meydana gelen gerilme değerleri, maksimum hidrodinamik kuvvetlerin gözlendiği dalga tepeleri ve çukurlarına karşılık gelen 2. saniye ve 6. saniyede zirve yapar.

### 2.3. Boru Hattı Modellerinin Maksimum Yer Değişimleri

Özellikle boru hattı ile deniz tabanı arasındaki mesafenin minimum olduğu sistemlerde maksimum yer değiştirme, gerilme kadar kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle yanlış proje tasarımı, boru hatlarında önemli yapısal deformasyonlara ve mali kayıplara yol açabilmektedir. Maksimum değerlerin karşılaştırmalı sonuçları,  $t=T/2$ ,  $T/4$ ,  $3T/4$  ve  $T$  zaman aralıkları göz önünde bulundurularak Şekil 6'da sunulmuştur.



**Şekil 6. Maksimum Yer Değişirme Değerlerinin Karşılaştırılması**

Maksimum yer değiştirmeler, dalga tepesi ve çukur konumlarında gözlemlenmiştir. Ancak, gerilme değerlerinden farklı olarak, çap ve et kalınlığı değerlerinin her ikisinin de yer değiştirmeyi azaltmaya katkıda bulunduğu açıktır. En büyük yer değiştirme,  $T=6s$ 'de  $D=500mm$  ve  $t=10mm$  olduğunda 12,193 mm olarak hesaplanmıştır. En küçük değer ise,  $T=8s$ 'de  $D=1000mm$  ve  $t=30mm$  olduğunda, deniz yüzeyinin sakin bir deniz yüzeyine döndüğü anda 0,137 mm olarak belirlenmiştir.

## 2.4. Çoklu Regresyon Analizleriyle Dinamik Davranışın Yorumu

Çalışmanın bu bölümünde, bağımlı değişkenler arasındaki ilişkileri içeren bir matematiksel denklem türetmek için Çoklu Regresyon tekniği kullanılmıştır. Veriler, Time History analizlerinden elde edilmiştir. Giriş parametreleri olarak boru çapı (D), et kalınlığı (tw), hidrodinamik kuvvet (FH) ve zaman (t) olarak tanımlandığında, çıkış parametreleri olarak maksimum yer değiştirme (wmax), maksimum gerilme ( $\sigma_{max}$ ) ve ilk üç modun doğal titreşim frekansları ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ) alınmıştır. Yalnızca doğrusal terimleri değil, aynı zamanda kuadratik terimleri de içeren Tam Kuadratik modeller, daha etkili ve özlü denklemler oluşturmak amacıyla geliştirilmiştir.

### 2.4.1. Girdi Parametreleri ile Maksimum Yer Değiştirme İlişkisi

Maksimum yer değiştirme değerleri üzerindeki etkili parametreler veri seti kullanılarak belirlenmiş ve bir matematiksel denklem geliştirilmiştir. Daha az etkili parametrelerin çıkarılmasıyla elde edilen en basit denklem aşağıda verilmiştir:

$$w_{max} = -8.77 + 0,00721 D + 0,1461 t_w + 0,003117 F_H + 15.64 t - 0,000002 D.F_H - 0,01285 D.t - 0.000022 t_w.F_H - 0,2611 t_w.t \quad (6)$$

Regresyon modeli, 0,912'ye ( $R^2$ ) yakın bir değerle yüksek bir uyum göstermektedir. Ayrıca, modelin MSE değeri 4,946 ve MAE değeri 1,791 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, denklemin boru hattının maksimum yer değiştirmelerini doğru bir şekilde tahmin edebildiğini göstermektedir. Etki oranları Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.  $w_{max}$  Değerleri İçin Varyans Analizi**

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri	%
D	1	0.000	0.000	0.000	0.999	0,000
t	1	0.000	0.004	0.000	0.965	0,000
<b>F<sub>H</sub></b>	<b>1</b>	<b>892.900</b>	<b>892.899</b>	<b>450.030</b>	<b>0.000</b>	<b>28,383</b>
t	1	2.960	2.960	1.490	0.224	0,094
<b>D.F<sub>H</sub></b>	<b>1</b>	<b>228.750</b>	<b>228.747</b>	<b>115.290</b>	<b>0.000</b>	<b>7,271</b>
D.t	1	27.760	27.763	13.990	0.000	0,882
<b>t<sub>w</sub>.F<sub>H</sub></b>	<b>1</b>	<b>74.900</b>	<b>74.897</b>	<b>37.750</b>	<b>0.000</b>	<b>2,381</b>
t <sub>w</sub> .t	1	26.780	26.785	13.50	0.000	0,851
Error	135	267.850	1.984			8,514
Total	143	3145.860				100,000

F-değeri, grup varyasyonu ile grup içi varyasyon arasındaki oranı ifade eder. Yüksek bir F-değeri, grup varyasyonunun grup içi varyasyondan daha büyük olduğunu gösterir. P-değeri ise ortalamalar arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Tablo 2'de görüldüğü gibi, %95 güven aralığında,  $F_H$  maksimum yer değiştirme üzerinde en etkili parametre olup, toplam etkinin %28,383'ünü oluşturmaktadır.  $DF_H$ 'nin etki oranı %7,271,  $twF_H$ 'nin ise %2,381'dir.

#### 2.4.2. Girdi Parametreleri ile Maksimum Gerilme İlişkisi

Gerilme değerleri, denizaltı boru hatlarının yapısal performansının ana göstergeleri olarak hizmet eder ve bu önemli altyapı sistemlerinin güvenliği, güvenilirliği ve sürdürülebilirliğini sağlamak için uygun bir şekilde değerlendirilmesi ve yönetilmesi gereklidir (Revie, 2015). Boru hattının geometrik özellikleri ile bu önemli parametrenin değişimini kısa ve pratik bir şekilde gösteren Tam Kuadratik model denklemi, Denklem 7'de sunulmuştur:

$$\sigma_{\max}=29.91-0.02200D-0.594t_w-0.016272F_H-53.4t+0.000010F_H+0.0396D.t+0.000162t_w.F_H+1.060t_w.t \quad (7)$$

Regresyon modeli, verilerin önemli bir kısmını açıkladığını gösteren 0,9522'lik güçlü bir  $R^2$  değeri sergilemiştir. Ayrıca, MSE 32,484 ve MAE 4,204 olarak belirlenmiştir. Performans metrikleri sonuçları, modelin tahminlerinin genellikle gerçek değerlere yakın olduğunu göstermektedir. ANOVA analizinin sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur.

**Tablo 3.  $\sigma_{\max}$  Değerleri İçin Varyans Analizi**

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri	%
D	1	0.000	0.000	0.000	0.998	0.000
$t_w$	1	0.000	0.000	0.000	0.985	0.000
$F_H$	<b>1</b>	<b>29159.00</b>	<b>29159.10</b>	<b>929.210</b>	<b>0.000</b>	<b>28.436</b>
t	1	28.000	28.400	0.900	0.343	0.027
<b>D.F<sub>H</sub></b>	<b>1</b>	<b>4462.000</b>	<b>4462.400</b>	<b>142.200</b>	<b>0.000</b>	<b>4.351</b>
D*t	1	264.000	264.300	8.420	0.004	0.257
<b><math>t_w.F_H</math></b>	<b>1</b>	<b>4138.000</b>	<b>4137.600</b>	<b>131.850</b>	<b>0.000</b>	<b>4.035</b>
$t_w.t$	1	441.000	441.400	14.070	0.000	0.430
Error	135	4236.000	31.400			4.131
Total	143	102541.0				100.000

Tablo 3'te görüldüğü gibi,  $F_H$ , maksimum gerilme değerleri üzerindeki en etkili parametre olup, %28,436 oranında etkiye sahiptir. D.F<sub>H</sub> için etki oranı %4,351,  $t_w.F_H$  için ise %4,035 olarak belirlenmiştir. Matematiksel modelde, boru hattının özellikleri 2-Yönlü Etkileşim terimleri (D.F<sub>H</sub> ve  $t_w.F_H$ ) ile temsil edilmiştir.

### 2.4.3. Girdi Parametreleri ile Doğal Titreşim Frekansı İlişkisi

Denizaltı boru hatlarının doğal titreşim frekansları, yapısal bütünlüklerinin ve dinamik kuvvetlere karşı dayanıklılıklarının sağlanmasında önemli bir faktördür (Hadi, Helmi, Cathaputra, Priadi, Dhaneswara, 2023). Bu nedenle, bu çalışmada boru hattı sisteminin dinamik performansı, ilk üç doğal titreşim frekansı kullanılarak değerlendirilmiştir. Değişkenler arasındaki ilişkileri tanımlamak amacıyla elde edilen tam kuadratik modelin denklemleri, ilk üç doğal titreşim frekansı için Denklem 8-10'da sunulmuştur.

$$\omega_1 = 0.2579 + 0.017284D - 0.014783t_w + 0.000001D.D \quad (8)$$

$$\omega_2 = -0.8808 + 0.049076D - 0.046780t_w - 0.000007D.D + 0.000012D.t_w \quad (9)$$

Birinci ve ikinci titreşim frekansı modelleri, bağımlı değişkendeki varyansın %100'ünü açıklar. Bu, modelin, bağımlı değişkenin ortalamasına göre tüm değişkenliği bağımsız değişkenleri kullanarak açıkladığı anlamına gelir. Ek olarak, hem MSE hem de MAE değerleri düşüktür:  $\omega_1$  için sırasıyla 4,019 ve 1,911;  $\omega_2$  için ise  $8,454e-3$  ve  $8,367e-2$  olarak kaydedilmiştir.

$$\omega_3 = 11.39 + 0.0463D + 0.153t_w + 0.000041D*D + 0.01720t_w.t_w - 0.001441D.t_w \quad (10)$$

Üçüncü doğal titreşim frekansı değerleri kullanılarak elde edilen model, 0,9437'lik güçlü bir  $R^2$  değeri sergilemektedir ve bu, verilerdeki varyansın önemli bir kısmını açıkladığını gösterir. Denkleme daha fazla değişken eklemek, gerçek tahmin yüzdesini düşürebilse de, sonuçlar kabul edilebilir sınırlar içerisinde. MSE değeri 5,461, MAE değeri

ise 1,758 olarak belirlenmiştir. Varyans Analizi (ANOVA) bulguları Tablo 4'te özetlenmiştir.

**Tablo 4.  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  Değerleri İçin Varyans Analizi**

	Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri	%
$\omega_1$	<b>D</b>	<b>1</b>	<b>976.437</b>	<b>976.437</b>	<b>1790539</b>	<b>0,000</b>	<b>99.768</b>
	<b>t<sub>w</sub></b>	<b>1</b>	<b>2.098</b>	<b>2.098</b>	<b>38469.04</b>	<b>0,000</b>	<b>0.214</b>
	D*D	1	0.165	0.165	3027.940	0,000	1.685e-5
	Error	140	0.008	0.000			8.174e-7
	Total	143	978.708				
$\omega_2$	<b>D</b>	<b>1</b>	<b>6398.670</b>	<b>6398.670</b>	<b>7985796</b>	<b>0.000</b>	<b>99.718</b>
	<b>t<sub>w</sub></b>	<b>1</b>	<b>13.820</b>	<b>13.820</b>	<b>172508.6</b>	<b>0.000</b>	<b>0.215</b>
	<b>D*D</b>	<b>1</b>	<b>4.210</b>	<b>4.210</b>	<b>52520.99</b>	<b>0.000</b>	<b>0.066</b>
	D*t <sub>w</sub>	1	0.040	0.040	484.950	0.000	0.001
	Error	139	0.010	0.000			0.001
	Total	143	6416.750				100.000
$\omega_3$	<b>D</b>	<b>1</b>	<b>26667.70</b>	<b>26667.70</b>	<b>2471.800</b>	<b>0.000</b>	<b>90.280</b>
	<b>t<sub>w</sub></b>	<b>1</b>	<b>551.900</b>	<b>551.900</b>	<b>51.160</b>	<b>0.000</b>	<b>1.868</b>
	D*D	1	154.300	154.300	14.300	0.000	0.522
	t <sub>w</sub> *t <sub>w</sub>	1	94.700	94.700	8.780	0.004	0.321
	<b>D*t</b>	<b>1</b>	<b>581.300</b>	<b>581.300</b>	<b>53.880</b>	<b>0.000</b>	<b>1.968</b>
	Error	138	1488.900	10.800			5.040
	Total	143	29538.80				100.000

Tablo 4'te görüldüğü üzere, regresyon modelinde D'nin etkisi %99,768 olarak hesaplanırken, t<sub>w</sub>'nin etkisi %0,214 olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, ikinci mod, yarım dalga desenine benzeyen tek döngülü bir salınım sunar. Bu nedenle, D'nin %99,718'lik ve t<sub>w</sub>'nin %0,215'lik etkilerine ek olarak, D.D terimi de %0,066'lık bir etki göstermektedir. Üçüncü mod, ek bir döngü daha ekleyerek karmaşık bir titreşim deseni ortaya çıkarmaktadır.



### 3. SONUÇ

Boru hatlarının kararlılığı, işlevselliklerini ve sürdürülebilirliklerini sağlamak açısından hayati öneme sahiptir. Çap ve kalınlık, denizaltı boru hatlarının stabilitesini önemli ölçüde etkileyen temel tasarım parametreleridir. Bu çalışma, çap, kalınlık ve stabilite arasındaki ilişkiyi araştırarak, bu faktörlerin boru hattı performansı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde anlamayı amaçlamıştır.

Sonuçlar, Tam Kuadratik model için önerilen denklemlerin, ilk iki doğal titreşim frekansı için en iyi performansı sergilediğini göstermektedir. Ancak, yer değiştirme tahmini için elde edilen ilişki, geçerlilik sınırları dahilinde kalmasına rağmen,  $R^2$  değeri açısından daha zayıf bir performans göstermektedir. Çap değişimlerinin, gerilme değerlerine kıyasla yer değiştirme değerleri üzerinde daha büyük bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum gerilme değerleri, diğer çıktılara kıyasla sayısal olarak daha büyük sonuçlar vermektedir. Bu nedenle, MSE ve MAE değerleri de buna bağlı olarak daha yüksektir. Bu bulgu, hidrodinamik kuvvetlerin gerilme ve yer değiştirme tahmin denklemlerinde baskın değişkenler olduğunu desteklemektedir. Daha büyük çaplar ve kalın cidarlar genel dayanımı artırırken, maliyetleri ve malzeme kullanımını da artırır. Bu faktörleri değerlendirmek amacı ile yapılan karşılaştırma, boru hattının maksimum yer değiştirme, maksimum gerilme ve doğal titreşim frekansının regresyon analizi kullanılarak tatmin edici bir doğrulukla tahmin edilebileceğini göstermektedir.

## **KAYNAKLAR**

- Ahmadian, P. (2015). Effect of Hydrodynamic Forces on Spanning Pipes (Master's thesis, Eastern Mediterranean University (EMU)-Doğu Akdeniz Üniversitesi (DAÜ)).
- Bai, Q., & Yong, B. (2014). 1-Introduction. In *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation* (pp. 5–24). Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Banik, D., Paul, R., Rathore, R. S., & Jhaveri, R. H. (2024). Improved Regression Analysis with Ensemble Pipeline Approach for Applications Across Multiple Domains. *ACM Transactions on Asian and Low-Resource Language Information Processing*.
- Bartrop, N.D.P., & Adams, A.J. (1991). *Dynamics of Fixed Marine Structures*, 3rd edn. Atkins Oil & Gas Engineering Limited, Epsom.
- Bethea, R. M., & Rhinehart, R. R. (2019). *Applied Engineering Statistics*. Routledge.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2013). *Ebook: Fluid Mechanics Fundamentals and Applications (SI Units)*. McGraw Hill.
- Chakrabarti, S. (2005). *Handbook of Offshore Engineering (2-volume set)*. Elsevier.
- Chen, W., Liu, C., Li, Y., Chen, G., Jeng, D., Liao, C., & Yu, J. (2020). An Integrated Numerical Model for the Stability of Artificial Submarine Slope under Wave Load. *Coastal Engineering*, 158, 103698.
- Chu, F. X., & Chen, S. Y. (2012). Optimal Design of Pipeline Based on the Shortest Path. *Physics Procedia*, 33, 216-220.

- Cevik, E., & Yüksel, Y. (1999). Scour under Submarine Pipelines in Waves in Shoaling Conditions. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 125(1), 9-19.
- Dagli, B. Y., Ergut, A., & Turan, M. E. (2023). Prediction of Natural Frequencies of Rayleigh Pipe by Hybrid Meta-Heuristic Artificial Neural Network. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(4), 221.
- Ducrozet, G., Bouscasse, B., Gouin, M., Ferrant, P., & Bonnefoy, F. (2019). CN-Stream: Open-Source Library for Nonlinear Regular Waves Using Stream Function Theory. *arXiv preprint arXiv:1901.10577*.
- Eicher, J. A., Guan, H., & Jeng, D. S. (2003). Stress and Deformation of Offshore Piles under Structural and Wave Loading. *Ocean Engineering*, 30(3), 369-385.
- Efendi, R., Nawi, N. M., Deris, M. M., & Burney, S. A. (2023). Cleansing of Inconsistent Sample in Linear Regression Model Based on Rough Sets Theory. *Systems and Soft Computing*, 5, 200046.
- El-Reedy, M. A. (2019). *Offshore Structures: Design, Construction and Maintenance*. Gulf Professional Publishing.
- Fernandes, A. P., Fonseca, A., Pacheco, F., & Fernandes, L. S. (2023). Water Quality Predictions through Linear Regression-A Brute Force Algorithm Approach. *MethodsX*, 10, 102153.
- Gong, S. W., Lam, K. Y., & Lu, C. (2000). Structural Analysis of a Submarine Pipeline Subjected to Underwater Shock.

- International Journal of Pressure Vessels and Piping, 77(7), 417-423.
- Gökkuş, Ü., Dağlı, B. Y., & Yıldırım, M. S. Wastewater Pipeline Design in Accordance with Sea-Pipe-Soil Interaction.
- Guo, B., Song, S., & Ghalambor, A. (2013). Offshore Pipelines: Design, Installation, and Maintenance. Gulf Professional Publishing.
- Gücüyen, E. (2015). Numerical Analysis of Deteriorated Sub-Sea Pipelines under Environmental Loads. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 28, 1163-1170.
- Hafez, K. A., Abdelsalam, M. A., & Abdelhameed, A. N. (2022). Dynamic On-Bottom Stability Analysis of Subsea Pipelines Using Finite Element Model-Based General Offshore Analysis Software: A Case Study. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 11(1), 1-17.
- Hadi, N., Helmi, M., Cathaputra, E., Priadi, D., & Dhaneswara, D. (2023). Freespan Analysis for Subsea Pipeline Integrity Management Strategy. Journal of Materials Exploration and Findings (JMFE), 1(3), 5.
- Harle, S. M. (2024). Advancements and Challenges in the Application of Artificial Intelligence in Civil Engineering: A Comprehensive Review. Asian Journal of Civil Engineering, 25(1), 1061-1078.
- Hou, R., & Xia, Y. (2021). Review on the New Development of Vibration-Based Damage Identification for Civil Engineering

- Structures: 2010–2019. *Journal of Sound and Vibration*, 491, 115741.
- Karampour, H., Albermani, F., & Gross, J. (2013). On Lateral and Upheaval Buckling of Subsea Pipelines. *Engineering Structures*, 52, 317-330.
- Liu, M., Wang, Z., Zhou, Z., Qu, Y., Yu, Z., Wei, Q., & Lu, L. (2018). Vibration Response of Multi-Span Fluid-Conveying Pipe with Multiple Accessories under Complex Boundary Conditions. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 72, 41-56.
- Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W., & Schaaf, S. A. (1950). The Force Exerted by Surface Waves on Piles. *Petroleum Transactions, American Institute of Mining Engineers*, 189, 149-154.
- Ni, P., Mangalathu, S., & Liu, K. (2020). Enhanced Fragility Analysis of Buried Pipelines through Lasso Regression. *Acta Geotechnica*, 15, 471-489.
- Revie, R. W. (Ed.). (2015). *Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety Handbook*. John Wiley & Sons.
- SAP 2000 V14 (Structural Analysis Program). (2000). *Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*. Berkeley (CA): Computers and Structures Inc.
- Sarpkaya, T. (1981). *Morison's Equation and the Wave Forces on Offshore Structures*. Naval Civil Engineering Laboratory, Carmel, CA, USA.
- Seghier, M. E. A. B., Keshtegar, B., Tee, K. F., Zayed, T., Abbassi, R., & Trung, N. T. (2020). Prediction of Maximum Pitting

- Corrosion Depth in Oil and Gas Pipelines. *Engineering Failure Analysis*, 112, 104505.
- Sharifi, S. M. H., & Tasdighi, M. (2019). Evaluation of Vortex Induced Vibration Effective Parameters on Free-Span Subsea Pipelines. *International Journal of Coastal, Offshore and Environmental Engineering (IJCOE)*, 4(3), 9-15.
- Silwal, B. (2013). An Investigation of the Beam-Column and the Finite-Element Formulations for Analyzing Geometrically Nonlinear Thermal Response of Plane Frames. Southern Illinois University at Carbondale.
- Squillante, M. S., Kaeli, D. R., & Sinha, H. (1997). Analytic Models of Workload Behavior and Pipeline Performance. In *Proceedings Fifth International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems* (pp. 91-96). IEEE.
- Stokes, G. G. (1847). On the Theory of Oscillatory Waves. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 8, 441-455.
- Uysal, I., & Güvenir, H. A. (1999). An Overview of Regression Techniques for Knowledge Discovery. *The Knowledge Engineering Review*, 14(4), 319-340.
- Xu, W. H., Pang, T., Yan, S. M., Zhai, L. B., Kang, Y. W., & Zhang, S. H. (2022). Prediction of Collapse Pressure of Submarine Pipelines in a Wide Range of Diameter-Thickness Ratio. *China Ocean Engineering*, 36(4), 565-574.

- Yang, H., & Wang, A. (2013). Dynamic Stability Analysis of Pipeline Based on Reliability Using Surrogate Model. *Journal of Marine Engineering and Technology*, 12, 75-84.
- Youssef, B. S., Cassidy, M. J., & Tian, Y. (2013). Application of Statistical Analysis Techniques to Pipeline On-Bottom Stability Analysis. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 135(3), 031701.
- Zan, X., & Lin, Z. (2020). On the Applicability of Morison Equation to Force Estimation Induced by Internal Solitary Wave on Circular Cylinder. *Ocean Engineering*, 198, 106966.





*MULTİDİSİPLİNER YAKLAŞIMLA GÜNCEL MÜHENDİSLİK PROBLEMLERİNİN ANALİZİ*

