

**MÜHENDİSLİKTE YENİLİKÇİ  
MALZEME, ÇEVRE VE GÜVENLİK  
ÇÖZÜM ÖNERİLERİ**

**Editör: Prof. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU**



**Prof. Dr. Tolga DEPCİ  
Prof. Dr. Didem SALOĞLU DERTLİ  
Prof. Dr. Muzaffer ZEREN  
Prof. Dr. İlke TAŞÇIOĞLU  
Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül YÜCEL  
Dr. Öğr. Üyesi Funda Gül KOÇ  
Dr. Fatma DİKÇAL AKARSU  
Öğr. Gör. Ece SİMOOĞLU SARI  
Yük. Müh. Halil DERTLİ  
Nida KÖSE**

**ISBN: 978-625-5923-18-9**

**Ankara -2025**

# MÜHENDİSLİKTE YENİLİKÇİ MALZEME, ÇEVRE VE GÜVENLİK ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

## EDİTÖR

Prof. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU  
ORCID ID:0000-0002-4661-8215

## YAZARLAR

Prof. Dr. Tolga DEPCİ<sup>1</sup>

Prof. Dr. Didem SALOĞLU DERTLİ<sup>2</sup>

Prof. Dr. Muzaffer ZEREN<sup>3</sup>

Prof. Dr. İlke TAŞÇIOĞLU<sup>4</sup>

Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül YÜCEL<sup>5</sup>

Dr. Öğr. Üyesi Funda Gül KOÇ<sup>6</sup>

Dr. Fatma DİKÇAL AKARSU<sup>7</sup>

Öğr. Gör. Ece SİMOOĞLU SARI<sup>8</sup>

Yük. Müh. Halil DERTLİ<sup>9</sup>

Nida KÖSE<sup>10</sup>

<sup>1</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,  
Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği, İskenderun, Hatay, Türkiye  
tolga.depci@iste.edu.tr  
ORCID: 0000-0001-9562-8068

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Afet Yönetim Enstitüsü, Afet ve Acil Durum  
Yönetimi Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye, saloglu@itu.edu.tr  
ORCID: 0000-0003-0503-056X

<sup>3</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme  
Mühendisliği, Kocaeli, Türkiye, zeren@kocaeli.edu.tr  
ORCID ID:0000-0001-5490-3799

<sup>4</sup>İstanbul Topkapı Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik  
Mühendisliği, İstanbul, Türkiye, ilketascioglu@topkapi.edu.tr  
ORCID ID: 0000-0001-9563-4396

<sup>5</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun MYO, Çevre Koruma ve  
Kontrol Bölümü, Hatay, Türkiye, aysegul.yucel@iste.edu.tr  
ORCID ID:0000-0001-7069-7518

<sup>6</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme  
Mühendisliği, Kocaeli, Türkiye, funda.demircan@kocaeli.edu.tr  
ORCID ID:0000-0001-6517-1239

<sup>7</sup>İstanbul Şişli Meslek Yüksekokulu, İstanbul, Türkiye  
fatma.dikcal@sisli.edu.tr  
ORCID: 0000-0002-9105-6530

<sup>8</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>9</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya Metalurji Fakültesi, Kimya  
Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, hder@itu.edu.tr  
ORCID: 0000-0001-6498-7594

<sup>10</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme  
Mühendisliği, Kocaeli, Türkiye  
nnnidakose@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14878759>



Copyright © 2025 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 – 2025©

**ISBN: 978-625-5923-18-9**

February / 2025

Ankara / Turkey

## ÖNSÖZ

Tüm canlılar için ihtiyaçların karşılanması bilim sayesinde sürdürülebilirlik kazanır. Bilim ve sanatın etkileşimi ile beraber ihtiyaçlar mükemmel bir konfor alanı içinde teknolojiye dönüşür. Teknoloji hayatımızdaki gündelik uygulamalardan uzay araçlarına kadar geniş bir alanı kapsar ve sürekli geliştirilmesi, yenilenmesi ve doğaya etkilerinin minimum düzeye getirilmesi gerekir. Teknolojinin gelişmesinde mühendislik bir yapı taşı görevi görür. Bu yapı taşının farklı disiplinlerden oluştuğu aşıkardır. Teknoloji günümüzde büyük bir hızla ilerlemektedir ve daha fazla gelişme sağlanması için tek bir mühendislik alanı yeterli kalmamaktadır. Bu nedenle çağımızda çok disiplinli mühendislik yaklaşımları ile karşılaşmak artık doğal bir süreç haline gelmiştir. Bu açıdan bakıldığında çok disiplinli mühendislik çalışmalarının daha yüksek bir potansiyel ile yeni ürünler, yaklaşımlar ve çözümler sunduğu görülmektedir. Ancak günümüzde ortaya konan mühendislik çözümlerinin çevreye etkileri göz ardı edilmemelidir. İhtiyaçların karşılanması için ortaya konan mühendislik çözümlerinin çevresel kaygıları dikkate alması ve ortaya çıkabilecek sorunların çözümüne yönelikte güvenlik tedbirleri oluşturması gerekir. Bu nedenle mühendislik uygulamalarının ve bu sayede ortaya çıkan ürünlerin, süreçlerin ve yöntemlerin çevresel ve güvenlik kavramları ile beraber ele alınması bir zorunluluktur. Bu kitap belirtilen bu bakış açısı ile malzeme, çevre ve güvenlik konularında faaliyet gösteren akademisyen, öğrenci ve ilgili sektör çalışanlarına nitelikli bir kaynak sunmak hedefiyle hazırlanmıştır.

Dört bölümden oluşan kitabın ilk bölümü çevresel sorunların en önemlilerinden birisi olan kurşun kirliliğini ele almaktadır. Bölümde toksik bir ağır metal olan kurşunun aktif karbon ile gideriminin optimizasyonuna yönelik çalışmalar ortaya konmaktadır. İkinci bölüm endüstriyel yangınlar ve patlamaları kapsamlı bir bakış açısı ile inceleyerek risklerin azaltılması için güvenlik önlemlerini, sürekli eğitimi ve denetim süreçlerini vurgulamaktadır. Üçüncü bölümde endüstriyel uygulamalarda malzemelerin kullanım süreçleri içinde performanslarının artırılmasına yönelik çözüm önerileri geliştirilmiştir. Seçilen farklı dökme demirlerin borlama işlemi ile yüzey özellikleri geliştirilmiş ve özellikle aşınmanın söz konusu olduğu uygulamalardaki potansiyel katkı değerlendirilmiştir. Kitabın son bölümünde ise Mn katkısının ince filmlerin özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Kitabın hazırlanmasına katkı veren tüm bölüm yazarlarına ve yayınevine teşekkür ederim. Kitabın okuyucularımızın tümüne faydalı olmasını temenni ederim.

Saygılarımla

**Prof. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU**





## **İÇİNDEKİLER**

ÖNSÖZ.....v

### **BÖLÜM 1**

MARKOV KARAR SÜRECİ KULLANILARAK AKTİF KARBON İLE KURŞUN GİDERİMİNİN OPTİMİZASYONU: TEORİK YAKLAŞIM.....(1-24)

Ayşegül YÜCEL

Tolga DEPCİ

### **BÖLÜM 2**

ENDÜSTRİYEL YANGINLAR VE PATLAMALAR: ÖZELLİKLERİ, GÜVENLİK ÖNLEMLERİ, İSTATİSTİKLER VE YÖNETMELİKLER.....(25-67)

Fatma Dikçal AKARSU

Halil DERTLİ

Didem SALOĞLU DERTLİ

### **BÖLÜM 3**

GGG40 VE GGG70 DÖKME DEMİR MALZEMELERİN BORLAMA İLE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ.....(68-82)

Ece SİMOĞLU SARI

Funda Gül KOÇ

Nida KÖSE

Prof. Dr. Muzaffer ZEREN

## **BÖLÜM 4**

Mn KATKILI ZnO ARAYÜZEY TABAKALI Al/p-Si DİYOTLARDA  
KATKI ORANININ ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERE  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ.....(83-102)

İlke TAŞÇIOĞLU

# BÖLÜM 1

## MARKOV KARAR SÜRECİ KULLANILARAK AKTİF KARBON İLE KURŞUN GİDERİMİNİN OPTİMİZASYONU: TEORİK YAKLAŞIM

Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül YÜCEL  
Prof. Dr. Tolga DEPCİ

### GİRİŞ

Endüstriyel faaliyetlerin artmasıyla birlikte ağır metal kirliliği, özellikle kurşun (Pb) kirliliği, küresel çevre sorunlarının başında gelmektedir. Kurşun, doğada doğal olarak bulunan toksik bir ağır metaldir ve endüstriyel atıklar, madencilik faaliyetleri, akü üretimi, boya sanayi ve benzeri kaynaklardan çevreye yayılmaktadır. Ağır metaller arasında kurşun iyonu [Pb(II)], Toksik Maddeler ve Hastalık Kayıt Ajansı'na (ATSDR) göre, ortaya çıkan endişe verici bir kirlenici olarak kabul edilmesi ve ikinci sırada (arsenikten sonra) yer alması nedeniyle öncelikli kirlenicilerden biri haline gelmiştir (Sharma ve diğ., 2024). Dünya Sağlık Örgütü (WHO) verilerine göre, kurşun maruziyeti 2021 yılında küresel olarak 1,5 milyondan fazla ölüme neden olmuş ve bu ölümlerin öncelikle kardiyovasküler etkilerden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Ayrıca kurşuna maruz kalmak beyin, karaciğer, böbrek ve kemiklere zarar verir. Küçük çocuklarda hatta daha anne karnında kemikten kana salınan kurşun toksik etki yaratır. Kurşun özellikle merkezi sinir sistemi üzerinde kalıcı olumsuz etkiye sahiptir. Hamilelerde kurşun maruziyeti bebeğin büyümemesine ve erken

doğuma neden olabilir. Yetişkinlerde de yüksek tansiyon, kardiyovasküler sorunlar ve böbrek hasarı riskinin artması dahil olmak üzere uzun vadeli zararlara neden olur (Dünya Sağlık Örgütü, 2024).

Su kaynaklarındaki kurşun kirliliğinin giderilmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar arasında kimyasal çöktürme, iyon değişimi, membran filtrasyonu, koagülasyon, ozmoz ve adsorpsiyon gibi teknikler bulunmaktadır (Sugumar ve diğ., 2024). Adsorpsiyon yöntemi, düşük maliyet, yüksek verimlilik ve kolay uygulanabilirlik özellikleriyle öne çıkmaktadır (Zhangve diğ., 2021). Aktif karbon, geniş yüzey alanı, gözenekli yapısı ve yüksek adsorpsiyon kapasitesi nedeniyle en yaygın kullanılan adsorban malzemelerden biridir (Solmaz, 2024; Ahmed ve diğ., 2022; Yadav ve diğ., 2019).

Aktif karbon ile kurşun gideriminin optimizasyonu, proses verimliliğini artırmak ve maliyetleri düşürmek açısından kritik öneme sahiptir. Optimizasyon sürecinde pH, sıcaklık, temas süresi, aktif karbon dozu ve başlangıç kurşun konsantrasyonu gibi çok sayıda parametre rol oynamaktadır. Bu parametrelerin dinamik etkileşimleri ve sistemin stokastik doğası, klasik optimizasyon yöntemlerinin etkinliğini sınırlamaktadır (Rodríguez-Narciso ve diğ., 2021; Jokić ve diğ., 2012).

Markov Karar Süreci (MKS), belirsizlik içeren dinamik sistemlerin (envanter kontrolü, planlama, finans ve tıp gibi) modellenmesi ve optimizasyonunda kullanılan güçlü bir matematiksel araçtır. MKS, sistemin mevcut durumuna bağlı olarak optimal

kararların alınmasını sağlayan bir çerçeve sunmaktadır (Steimle, Kaufman, ve Denton 2021).

Bu çalışmada, aktif karbon ile kurşun gideriminin optimizasyonu için MKS tabanlı yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen model, adsorpsiyon sisteminin durumlarını (state), mümkün olan aksiyonları (action) ve geçiş olasılıklarını (transition probabilities) tanımlayarak, optimal teorik proses parametrelerinin belirlenmesini amaçlamaktadır.

### **AKTİF KARBON KULLANARAK KURŞUN GİDERİMİ**

Kurşun kirliliğinin kontrol altına alınmasında aktif karbon, üstün adsorpsiyon kapasitesi ve çevre dostu özellikleriyle öne çıkan bir malzemedir. Yüksek gözeneklilik yapısı sayesinde aktif karbon, ağır metallerin sulu çözeltilerden etkin bir şekilde uzaklaştırılmasında etkili bir adsorban olarak kullanılmaktadır. Kurşun iyonlarının aktif karbon yüzeyine bağlanması hem fiziksel hem de kimyasal etkileşimler yoluyla gerçekleşerek yüksek giderim verimliliği sağlar. Düşük maliyeti, geniş uygulama alanı ve işlem kolaylığı sayesinde aktif karbon hem küçük ölçekli laboratuvar çalışmalarında hem de büyük ölçekli endüstriyel süreçlerde yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, adsorpsiyon işleminin etkinliği, doz miktarı, temas süresi, pH ve başlangıç kurşun konsantrasyonu gibi işlem parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle, aktif karbonun kurşun giderimindeki performansını artırmak için süreç optimizasyonuna yönelik çalışmalar, farklı alanlarda daha yaygın kullanılan karar modellerinin tartışılması büyük önem taşımaktadır.

Jock ve diğ., (2022) çalışmalarında, Hindistan cevizi kabuğundan üretilen ve NaOH ile modifiye edilmiş aktif karbon kullanılarak sulu çözeltideki kurşun metal iyonlarının giderimini araştırmışlardır. NaOH modifikasyonu ile 600°C aktivasyondan 304,38 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> ve modifikasyon olmadan 281,19 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> (300°C) yüzey alanına sahip aktif karbonlar elde etmişlerdir. Hindistan cevizi kabuğu modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş adsorbanlar için sırasıyla 91,70 ve 73,90 mg.g<sup>-1</sup>lık maksimum adsorpsiyon kapasitesine ulaştıklarını bildirmişlerdir (Jock ve diğ., 2022).

Ibrahim ve Rashwan (2022), ticari aktif karbonu amonyak ile aktive etmişler ve her iki aktif karbonunda kurşun ve kadmiyum iyonlarının gideriminde etkisini incelemişlerdir. pH değeri ile ilgili yapılan çalışmalarda pH 6,5 civarında iyon gideriminin yüksek olduğu ve sonrasında sabit kaldığını ifade etmişlerdir. Ham aktif karbonun kurşun iyon giderimi %86,7 iken amonyak ile aktive edilen aktif karbonun ise kurşun iyon gideriminin %98'e ulaştığını tespit etmişlerdir (Ibrahim ve Rashwan 2022).

Ly (2022) bambu ağacından elde ettiği aktif karbon ile sulu çözeltiden kurşun iyonu giderimi yapmıştır. Bambu ağacından elde edilen aktif karbon ile 120 dakikalık kurşun iyonu temas süresi sonunda yaklaşık %97 adsorpsiyon verimi elde edilmiştir (Ly 2022).

Chimdessa ve Ejeta (2022), avokado çekirdeğinden elde ettikleri aktif karbon ile bakır, kadmiyum ve kurşun iyonlarının gideriminde araştırmışlardır. Kadmiyum ve kurşun iyonlarının gideriminde en yüksek giderimi sağlayan adsorban miktarı 500 mg, bakır iyonlarının

gideriminde en yüksek verim için kullanılan adsorban miktarı ise 700 mg olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca iyon giderme verimleri bakır, kurşun ve kadmiyum iyonları için sırasıyla %87, %89,4 ve %99,5 olduğunu tespit etmişlerdir (Chimdessa ve Ejeta 2022).

Onyemenonu ve diğ., (2023) pul kabuklu bir yapıya sahip olan *Pterocarpus santalinoides* ağacının ham ve aktif karbon haline getirilmiş haliyle kurşun iyonlarının giderimini araştırmışlardır. Adsorban dozu, kurşun iyonu başlangıç konsantrasyonu, temas süresi ve çözelti sıcaklığı gibi parametrelerin etkisini incelemişlerdir. Hem ağacın ham hali hem de aktif karbon olarak elde edilen her iki malzeme 80 dakika temas süresinde dengeye gelmelerine rağmen aktif karbon ham malzemeye göre yaklaşık %10 gibi daha yüksek giderim verimine ulaştığını tespit etmişlerdir. Başlangıç kurşun iyon konsantrasyonunda ise konsantrasyon miktarları arttıkça kurşun iyon gideriminin azaldığı görülmüştür. Her iki adsorban malzeme, başlangıç konsantrasyonu 10 mg.L<sup>-1</sup> çözelti ortamında en yüksek kurşun iyon giderim verimi sağladığını bildirmişlerdir (Onyemenonu, Osuji ve Ngobiri 2023).

Arunkumar ve diğ., (2023) at nalı olarak bilinen *Vitex negundo* çalılarından aktif karbon elde etmişler ve kurşun iyonu gideriminde potansiyelini araştırmışlardır. Çalıdan elde edilen karbon malzemesinin aktive edilebilmesi amacıyla H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanmışlardır. Kurşun gideriminde pH değerinin 6 civarında sıcaklığın ise yaklaşık 30°C olduğu sürecin optimum koşullar olduğu tespit edilmiştir (Arunkumar ve diğ., 2023).

Sharma ve diğ., (2024) java eriği sapından elde ettiği aktif karbondan kurşun iyonlarının giderimini araştırmışlardır. Java eriği karbonize edilen ham hali ile KOH ilave edilerek aktive edilmiş hali çalışmada kullanılmıştır. Aktif karbonun kurşun gideriminde ham java eriği karbonuna göre %78 daha yüksek bir verim sağladığı görülmüştür. Çalışmada pH, sıcaklık, temas süresi, adsorban miktarı ve başlangıç kurşun konsantrasyonları parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. (Sharma ve diğ., 2024).

Alam ve diğ., (2024) ACUTLaqE (Aktif Karbon Kullanılmış ay Yaprakları Sulu Ekstraktı) kullanarak sulu çözeltiden kurşun iyonlarının giderimini amaçlamışlardır. Bu kompozitin kurşun gideriminde %99'luk verime ulaştığını bildirmişlerdir (Alam ve diğ., 2024).

Divahar ve diğ., (2024) elektronik atıkların biyolojik sızıntı suyundan kurşun iyonlarının giderilmesi amacıyla limon kabuğundan elde ettikleri aktif karbonun kullanabilirliğini araştırmışlardır. Limon kabuğundan elde ettikleri aktif karbonun ( $603,7 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ ) ticari aktif karbonun ( $990 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ ) yüzey alanından daha düşük olmasına rağmen kurşun iyonlarının gideriminde yüksek performans gösterdiğini bildirmişlerdir. Kurşun iyonlarının giderim veriminin limon kabuğundan elde edilen aktif karbon ile %81,25 olduğunu bildirmişlerdir (Divahar ve diğ., 2024).

Prabakaran ve diğ., (2024) Meksika'ya özgü bir ağaç olan *Pithecellobium Dulce*'den elde ettikleri aktif karbonu kurşun iyonlarının gideriminde kullanmışlardır.  $30^\circ\text{C}$ - $60^\circ\text{C}$  arasında yapılan



çalışmalarda kurşun giderim verimi sıcaklık yükseldikçe artarken başlangıç kurşun gideriminin artmasıyla azalmıştır. En yüksek kurşun giderim veriminin 10 mg.L<sup>-1</sup> başlangıç konsantrasyonunda ve 60°C'de %91,57 olduğunu bildirmişlerdir (Prabakaran ve diğ., 2024)

Aliyu ve diğ., (2024) mısır koçanından elde ettikleri aktif karbonu kullanarak kurşun iyonlarının giderimini incelemişlerdir. Sentezlenen aktif karbon üzerindeki kurşun iyonu gideriminde en yüksek kurşun giderimi, 2 saatte 2,5 g.L<sup>-1</sup> adsorban miktarında %95 olduğunu ve en yüksek adsorpsiyon kapasitesinin ise 16,46 mg.g<sup>-1</sup> olduğu tespit etmişlerdir (Aliyu, Salahudeen ve Rasheed 2024).

Bakather (2024), üzüm ağacından elde edilen aktif karbonu kullanmıştır. Çalışmasında pH 5, 25 °C, 100 mg.L<sup>-1</sup> başlangıç Pb<sup>2+</sup> iyon konsantrasyonunda 135,7 mg.g<sup>-1</sup>lik kurşun giderimine ulaşıldığını bildirmiştir (Bakather 2024).

Farklı ham maddelerden üretilen aktif karbonlar yardımıyla kurşun giderimi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Genel itibari ile bu çalışmalarını aktif karbonların üretimi (i) ve aktif karbonların kurşun gideriminde kullanılan parametreler (ii) olarak ayırmak mümkündür.

Aktif karbonun kurşun iyonlarının giderilmesindeki etkinliği, uygulanan aktivasyon yöntemlerine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Farklı aktivasyon teknikleri, aktif karbonun yüzey özelliklerini ve fonksiyonel gruplarını iyileştirir ve bu da kurşun iyonları için adsorpsiyon kapasitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir (Ahmed ve diğ., 2022; Kim, Kim ve Baek, 2023)

Aktif karbon kullanılarak kurşun iyonlarının uzaklaştırılmasındaki adsorpsiyon parametrelerinin etkinliği, pH, adsorban miktarı, başlangıç kurşun konsantrasyonu ve sıcaklık gibi çeşitli kritik faktörlerden etkilenir. Bu parametreler, aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesini ve verimliliğini belirleyici rol oynar ve kurşun iyonlarının giderimi için alternatif bir seçenek olup olmadığını belirleyebilir. Yapılan kurşun giderim çalışmalarında artan pH değeri ile giderimin arttığı ancak en yüksek giderim verimine ulaşabilmek için pH değeri 5 – 6 arasında olması gerektiği sunulmuştur (Ibrahim ve Rashwan, 2022; Sharma ve diğ., 2024). Adsorban malzemesinin miktarının artması kurşun iyonunun tutunabileceği bölgeleri arttıracığından kurşun iyonu giderim verimini de arttıracaktır (Ibrahim ve Rashwan, 2022). Başlangıç kurşun iyonu konsantrasyonu parametresi incelendiğinde ise ters bir etkinin olduğu görülmüştür. Bir başka deyişle başlangıç konsantrasyonu azaldıkça kurşun iyonu giderim veriminin arttığı söylenebilir (Sharma, ve diğ., 2024). Bir diğer parametre ve giderim konusunda büyük etkilere sahip olan sıcaklık parametresidir. Bu parametrede adsorban ile kurşun iyonu arasında moleküler bir etkiye sahiptir. Burada adsorban ile kurşun iyonu arasında yüksek bir çekim kuvveti oluşturarak ya da adsorbanda bulunan bölgelerdeki bağları zayıflatarak geniş bir yüzey alanı oluşturarak etkiler. Böylelikle kurşun iyonlarının adsorban olarak kullanılan aktif karbon tarafından tutulması ve çözeltilerdeki kurşun konsantrasyonunun azalmasına neden olur (Onyemenonu, ve diğ., 2023).

## MARKOV KARAR SÜRECİ

Yapay zeka kavramı “Makineler düşünebilir mi?” sorusuyla 1950 yılında Alan Turing tarafından ilk kez gündeme gelmiştir (İnce, İmamoğlu ve İmamoğlu, 2021). Yapay zeka, günümüzde yaygın kullanılan bir teknoloji olarak görülse de henüz karar alma sistemi insanların anlayabileceği düzeyde değildir (Jang ve diğ., 2024). Ancak üretken yapay zekayı kullanmak problemlerin çözümünde insanoğluna birçok yönden katkı sağlayacaktır. Bu katkılar şu şekilde sıralanabilir:

- *Kaynak ve zaman tasarrufu*

Yapay zeka büyük miktarda veriyi insanoğluna göre daha hızlı bir şekilde işleyebilir ve analiz edebilir.

- *Büyük verilerin anlamlandırılması ve hata ayıklama ve doğruluk artışı*

Modern dünyada üretilen veri miktarı gün geçtikçe artmaktadır. Bu verilerden anlamlı sonuçların çıkarılması ve stratejik önemde kararların alınmasında yapay zeka oldukça önemli rol oynamaktadır. Ayrıca çeşitli nedenler ile insanoğlunun gözünden kaçan hataların bulunması yapay zeka algoritmalarıyla oldukça hızlı ve tutarlı şekilde ortaya çıkabilir.

- *Yenilik ve inovasyon hızlanması*

Yapay zeka makine öğrenmesi ile elde ettiği verileri hızlıca gözden geçirerek karmaşık problemlerin çözümünü ve yeni yaklaşımların geliştirilmesine olanak sağlayabilir.

Bir problemin çözümünde yapay zeka algoritmalarının kullanılması ve bunun bir süreç halinde geliştirilmesi mümkündür. . Bu

süreç ise makine öğrenmesi ile mevcut soruna dair verilerin analiz edilmesi ve bilinmeyene dair yapılan tahminler, yapay zeka ile karar verme yetisine dönüşmektedir (Atalay ve Çelik, 2017).

Makine öğrenmesi ile desteklenmiş bir yapay zeka modeli, öncelikle mevcut problemin tanımlaması ile sürece başlar. Bir sonraki aşama problemle ilgili verilerin toplanması ve bu verilerin işlenmesidir. Söz konusu problemin çözümüne ulaşabilmek amacıyla en iyi çözüm algoritmasının geliştirilmesi ile devam edilirken uygun yapay zeka modeli tercih edilir. Bundan sonraki süreçte ise model testi kullanılarak modelin doğruluk oranının bir başka deyişle çalışma performansının belirlenmesi değerlendirilir. Modelin performansının artırılmasında ve varsa hataların düzeltilmesinde optimizasyon sürece dahil edilir. Nihai çözüm, problem için uygulanabilir düzeyde olduğunda kullanıma sunulur.

Karar verme kavramı, belirlenen bir amacın gerçekleştirilmesi ile ölçülebilen yönetsel bir işlemdir. Karar türüne veya karar verme modeline göre süreç değişiklik gösterecektir. Bu nedenle birçok alanda büyük verilerin analizi, hataların en aza indirilmesi, belirsizlik ve karmaşıklık gibi faktörler nedeniyle yapay zeka kullanılmaktadır (Jarrahi, 2018). Bu tip problemlerin çözümü için 1950’li yıllarda Markov Karar Süreci olarak adlandırılan bir sıralı karar verme modeli ortaya çıkmıştır.

Yapay zekanın karar verme süreçleri, problemin çözümüne uygun algoritmalar ve yaklaşımlar kullanılarak optimize edilmektedir. Karar verme süreçleri arasında kural tabanlı sistemler, olasılıksal modeller,

makine öğrenmesi (ML) ve derin öğrenme (DL) gibi yöntemler yer almaktadır. Ayrıca, Markov karar süreçleri (Markov Decision Processes, MDPs) gibi matematiksel modeller de karar verme mekanizmalarını modellemek için sıklıkla kullanılabilir.

Yapay zekanın karar verme süreçleri arasında if-else mantığına dayanan kural tabanlı sistemler mevcuttur. Bu sistemlerin uygulanması basit ve kolay olmasına rağmen karmaşık problemlerde yetersiz kalabilmektedir. Belirsizliğin olduğu durumlarda ise olasılık teorisine dayanarak karar veren sistemler örneğin Bayesian ağları kullanılabilir. Ancak bu sistemlerin maliyeti yüksek ve büyük veri setlerine ihtiyaç duymaktadır. Makine öğrenmesi (ML) ve derin öğrenme (DL) karar verme süreçlerinde ise makine öğrenmesi veri setlerini öğrenerek model geliştirirken derin öğrenme büyük ve karmaşık veri setlerini analiz ederek kararlar almaktadır. Makine öğrenmesi yapılandırılmış veriye bağımlı olması, derin öğrenmenin büyük veri setlerinde yüksek hesaplama gücü olması göreceli olarak dezavantaj sayılabilmektedir. Uzun vadeli sonuçları optimize ederek belirsizliği en aza indirerek avantaj sağlayan Markov karar süreci bir karar verme probleminde durum (state), eylem (action), geçiş olasılığı ve ödül fonksiyonu bileşenlerinden oluşan bir matematiksel modelleme sunmaktadır.

Markov karar süreçleri otomatik kontrol sistemlerinde, robotların hareket planlamasında ve enerji optimizasyonunda kullanılmaktadır. Ayrıca sağlık alanında tedavi planlamasında, ekonomi ve finans alanında portföy optimizasyonunda, sigorta risk analizi ve piyasa davranışlarının tahmininde kullanılabilir (Büyüktatlı, İşbilir, ve

İpekçi Çetin, 2013). Bir diğer kullanım alanı ise taşıma ağlarının optimizasyonu ve rota planlaması olarak değerlendirilmesidir (Jain, 2024).

Markov karar süreçleri, farklı disiplinlerde zamana bağlı kararların alınması ve uzun vadeli hedeflerin optimize edilmesi gereken durumlarda kullanışlı olabilmekte, özellikle belirsizlik ve değişkenliklerin fazla olduğu sistemlerde kritik bir role sahip olduğu düşünülmektedir.

## **KURŞUN GİDERİMİNDE MARKOV KARAR SÜREÇLERİ KULLANARAK TEORİK MODEL GELİŞTİRME**

Ağır metal, boya gibi kirliliklerin gideriminde en yaygın kullanılan yöntem adsorpsiyon yöntemidir. Bu yöntemde kirleticiler adsorban malzemenin örneğin aktif karbonun yüzeyine ve kılcal boşluklarına tutunması prensibine dayanmaktadır. Bir kirliliğin gideriminde bu sürecin optimizasyonu adsorban seçimi, adsorban miktarı, adsorban giderim kapasitesi, adsorpsiyon kinetiği ve tekrar kullanılabilirlik gibi parametrelere bağlıdır.

Markov karar süreçleri, sonuçların kısmen rastgele ve kısmen karar vericinin kontrolünde olduğu ortamlarda karar vermeyi modellemek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu nedenle bu yöntemin kullanımında adsorpsiyon süreçlerinin optimize edilmesi ve yönetilmesi için uygun bir yöntem olabilir.

Markov karar süreçlerinin kullanılan adsorpsiyon yöntemi adımlarına uyarlanması aşağıda sırasıyla verilmiştir.

## 1. Durum ve eylem modelleme

- Durum: Aktif karbonun yüzeyinde kurşun iyonlarının tutunması, çözelti içerisinde kurşun iyonlarının konsantrasyonu, pH değeri, çözelti sıcaklığı gibi değişkenler durumu ifade etmektedir.
- Eylem: Aktif karbonun değiştirilmesi, yenilenmesi, farklı aktif edici ajanların kullanılması, adsorpsiyon koşullarının değiştirilmesi ise eylemleri tanımlamaktadır.

## 2. Geçiş olasılıkları

Adsorpsiyon sürecinde durumlar arası geçiş olasılıklarını kinetik modeller ile ya da deneysel çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak tahmin edilebilmesi geçiş olasılıklarını oluşturabilir. Örneğin çözelti pH değerindeki değişikliğin kurşun iyonlarının aktif karbon üzerinde tutunma kapasitesini nasıl etkileyebileceği geçiş olasılıkları ile ön görülebilir.

## 3. Ödül fonksiyonu

Ödül fonksiyonu adımıında amaç örneğin en az aktif karbon miktarıyla en yüksek kurşun gideriminin sağlanması olarak ifade edilebilir. Başka bir örnek olarak birim enerji başına adsorbe edilen kurşun iyonu miktarı ödül fonksiyonu olarak tanımlanabilir.

## 4. Optimizasyon

Deneysel verilerle oldukça uzun zaman alacak sonuçlar bu adımda optimize edilebilir. Başka bir deyişle, en az maliyet ya da en az aktif karbon miktarı ile en yüksek kurşun iyonu giderimi sağlayan adsorpsiyon süreci tasarlanabilir.

Bir yapay zeka modeli olan Claude AI kullanılarak kurşun iyonlarının aktif karbon ile gideriminde Markov karar süreci algoritması oluşturulmuş. Bu süreçte adsorban miktarı, başlangıç kurşun iyon konsantrasyonu, temas süresi, sıcaklık ve pH değeri parametrelerinin kullanımı tercih edilmiştir. Bu çalışmanın algoritma adımları ve belirlenen parametre koşulları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

#### 1. Durum:

- Adsorban miktarı (500 – 3000 mg)
- Başlangıç kurşun iyonu konsantrasyonu (10 – 100 mg.L<sup>-1</sup>)
- Temas süresi (30 – 180 dakika)
- pH değeri (2 – 8)
- Sıcaklık (20 – 50°C)

#### 2. Eylem

- Her parametre için artış/azalış eylemleri
- Aktif karbon miktarı değişimi ( $\pm 500$  mg.L<sup>-1</sup>)
- Temas süresi değişimi ( $\pm 30$  dakika)
- pH değeri değişimi ( $\pm 1$ )
- Sıcaklık değişimi ( $\pm 5^\circ\text{C}$ )

#### 3. Ödül Fonksiyonu

- Giderim verimindeki artışa göre pozitif ödül
- Minimum giderim verimi altında ceza
- Enerji kullanımını için sıcaklık değişimine bağlı ceza

#### 4. Q – Öğrenme Algoritması

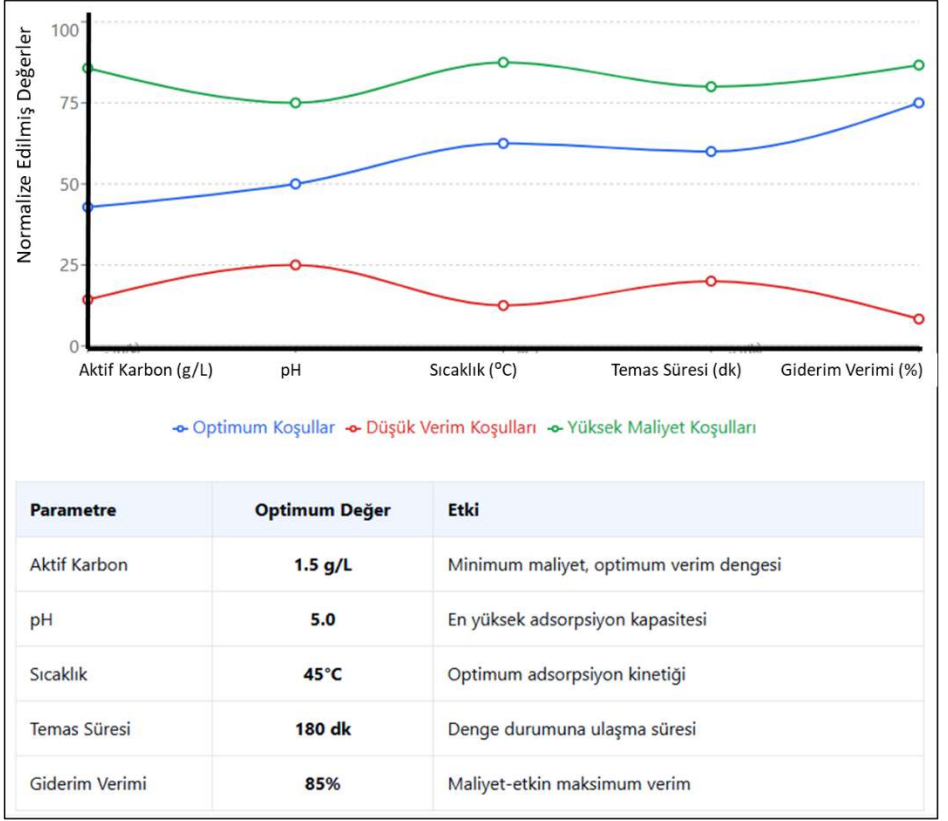
- Epsilon-greedy keşif stratejisi



- Gamma indirgeme faktörü ile gelecek ödüllerin değerlendirilmesi
- Terminal durumlar için kontrol

Q-Öğrenme (Q-Learning), pekiştirmeli öğrenme (Reinforcement Learning) alanında kullanılan ve bir ajanın, bir ortamda nasıl hareket etmesi gerektiğini öğrenmesini sağlayan modelden bağımsız bir algoritmadır. Bu algoritma, ajanların belirli durumlarda hangi eylemleri seçerek en yüksek toplam ödülü elde edebileceğini öğrenmelerine yardımcı olan bir süreçtir.

Yapay zekadan bu algoritmanın çalışmasını test etmesi istendiğinde başlangıç aktif karbon miktarını ( $1000 \text{ mg.L}^{-1}$ ), başlangıç kurşun iyonu konsantrasyonunu ( $50 \text{ mg.L}^{-1}$ ), başlangıç temas süresi (60 dakika), başlangıç pH değeri (6) ve başlangıç sıcaklık ( $25^\circ\text{C}$ ) parametreleri ile bir senaryo oluşturmuştur. Q – öğrenme algoritması ile 1000 episode (olay zinciri) çalıştırmıştır. Her parametrenin zaman içindeki değişimi ve ödül değerlerinin değişimi sonuçlarını optimal politikayı kullanarak başlangıç ve son durum özetlerini sunmuştur. Son olarak en az aktif karbon kullanımıyla en yüksek kurşun giderimi için optimum parametrelerin sonucu görselleştirme (Şekil 1) olarak istenmiştir. Y ekseninde normalize edilmiş değerler verilirken X ekseninde ise kullanılan parametreler (aktif karbon miktarı, pH, sıcaklık, temas süresi ve giderim verimi) sıralanmıştır. Optimum çalışma parametreleri en az aktif karbon miktarı  $150 \text{ mg.L}^{-1}$ , en yüksek kurşun iyon giderimi %85, optimum pH değeri 5, sıcaklık  $45^\circ\text{C}$  ve temas süresini ise 180 dakika olarak belirlemiştir.



**Şekil 1.** Yapay zekanın kurşun giderimindeki optimum parametreler görseli

Aktif karbon yardımıyla kurşun iyonlarının gideriminde Markov karar sürecinin uygulanabilirliği ve ayrıca Claude yapay zeka modelinin tercih edilmesi ile teorik olarak incelenmeye çalışılmıştır. Elde edilen verilerin literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Markov karar süreçlerinin adsorpsiyon yöntemlerinde kullanılması uygun ve faydalı olabileceği, bu yaklaşım ile süreçlerin dinamik ve belirsiz yapısını modelleyerek optimize edilebileceği ön görülmüştür.

## SONUÇ

Sürdürülebilir, verimli ve etkin yöntemlerin geliştirilmesinde katkı sağlamak amacıyla belirsiz yapısal özellik taşıyan kirlilik giderim yöntemlerinden biri olan adsorpsiyon yönteminde Markov karar süreçleri ile birlikte bir yapay zeka modelinin kullanılması önem arz etmektedir. Farklı kullanım alanlarına sahip Markov karar sürecinin adsorpsiyon yöntemi gibi çalışmalarda kullanılması dinamik koşulların (konsantrasyon, adsorban miktarı, sıcaklık, pH vb.) yönetiminde, uzun vadeli planlamada, veri tabanlı karar verme ve kaynak kullanımının optimizasyonu gibi avantajlar sunabilmektedir. Ayrıca kullanılan yapay zeka modelinde ise farklı parametrelerin karşılaştırılması, bir den fazla grafik türünün kullanılması, farklı koşullar girilerek detaylı proses sonuçları değerlendirilebilir. Bu çalışmada adsorban malzemesi olarak aktif karbon ve kurşun iyonunun giderimi üzerine yoğunlaşmış ve teorik bir bakış açısı olarak değerlendirilmiştir. Söz konusu çalışma temel alınarak farklı adsorban malzemeler ile kirlilik giderimi konusunda deneysel çalışmalar yapılarak Markov karar sürecinin adsorpsiyon yönteminde kullanımı daha yaygınlaştırılabilir. Ayrıca kirlilik giderimi ve adsorban malzeme üretimi parametreleri girilerek de yapılan çalışmanın bir maliyet analizi yapılarak elde edilen veriler endüstriyel ölçekte değerlendirilme olasılığı irdelenebilir.

## KAYNAKLAR

- Ahmed, Shams Forruque, M. Mofijur, Tahlil Ahmed Parisa, Nafisa Islam, F. Kusumo, Abrar Inayat, Van Giang Le, Irfan Anjum Badruddin, T. M. Yunus Khan, and Hwai Chyuan Ong. 2022. "Progress and Challenges of Contaminate Removal from Wastewater Using Microalgae Biomass." *Chemosphere* 286. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131656.
- Alam, Md Mukter, Azmira Sultana, Md Rayhan Sarker, Md Delwar Hossain, and Md Abdul Jabbar. 2024. "Removal of Lead Using Novel Composite Synthesized from Rice Husk and Used Tea Leaves Extract." *Textile and Leather Review* 7:1118–42. doi: 10.31881/TLR.2024.073.
- Aliyu, S. A., N. Salahudeen, and A. A. Rasheed. 2024. "Adsorptive Removal of Lead (II) Pollutants from Wastewater Using Corn-cob-Activated Carbon." *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)* 11:H1–10. doi: 10.21272/jes.2024.11(2).h1.
- Magdy Ibrahim and Mai Rashwan. 2022. "Removal of Cd (II) and Pb (II) Ions from Aqueous Solutions Using Raw and Modified Activated Carbon." *Journal of Soil and Water Sciences* 7:27–37. doi: 10.21608/jsws.2022.290564.
- Anon. n.d. "Lead Poisoning." <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>.
- Arunkumar, A., T. Chandrasekaran, M. Vinoth, and K. Riaz Ahamed. 2023. "Removal of Lead (II) Ion from Industrial Wastewater by

Activated Carbon Prepared from Vitex Negundo Using Batch Adsorption Studies.” *Indian Journal of Chemical Technology* 30:392–97. doi: 10.56042/ijct.v30i3.70662.

Atalay, Muhammet, And Enes Çelik. 2017. “Büyük Veri Analizinde Yapay Zekâ Ve Makine Öğrenmesi Uygulamaları - Artificial Intelligence And Machine Learning Applications In Big Data Analysis.” *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi* 155–72. doi: 10.20875/makusobed.309727.

Bakather, Omer Y. 2024. “Eco-Friendly Biosorbent for Lead Removal: Activated Carbon Produced from Grape Wood.” *Desalination and Water Treatment* 317. doi: 10.1016/j.dwt.2024.100210.

Büyüktatlı F., İşbilir, S. and İpekçi Çetin E. . 2013. “Markov Analizi Ile Yıllık Ödeneklere Bağlı Bir Tahmin Uygulaması.” *Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi* 5(1).

Chimdessa, Mitiku Abdisa, and Birhanu Aseffa Ejeta. 2022. “Removal of Cadmium, Copper and Lead from Aqueous Solution Using Activated Carbon Prepared from Avocado Kernel.” *Oriental Journal Of Chemistry* 38:65–71. doi: 10.13005/ojc/380107.

Christopher C. Onyemenonu, Leo C. Osuji, and Nnaemeka C. Ngobiri. 2023. “Removal of Lead Ions from Wastewater Using Raw and Activated Carbon of Pterocarpus Santalinoides Shell.” *World Journal of Advanced Research and Reviews* 19:781–92. doi: 10.30574/wjarr.2023.19.3.1886.

- Divahar, R., T. Meenambal, J. Senophiyah Mary, P. S. Aravind Raj, S. P. Sangeetha, and S. Athavan Alias Anand. 2024. "Lemon Peel Activated Carbon: A Sustainable Solution for Lead Ion Removal from E-Waste Bioleachate." *Sustainable Chemistry for the Environment* 6. doi: 10.1016/j.scenv.2024.100094.
- İnce, Hüseyin, Sena Esin İmamoğlu, And Salih Zeki İmamoğlu. 2021. "Yapay Zeka Uygulamalarının Karar Verme Üzerine Etkileri: Kavramsal Bir Çalışma." *International Review of Economics and Management* 9(1):50–63. doi: 10.18825/iremjournal.866432.
- Jain, Kunal. n.d. "Beginner Guide to Basic Machine Learning: Concepts and Techniques." 20/01/2025 tarihinde <https://www.Analyticsvidhya.Com/Blog/2015/06/Machine-Learning-Basics/>.
- Jang, Soobin, Haeyoon Lee, Yujin Kim, Daeho Lee, Jungwoo Shin, and Jungwoo Nam. 2024. "When, What, and How Should Generative Artificial Intelligence Explain to Users?" *Telematics and Informatics* 93:102175. doi: 10.1016/j.tele.2024.102175.
- Jarrahi, Mohammad Hossein. 2018. "Artificial Intelligence and the Future of Work: Human-AI Symbiosis in Organizational Decision Making." *Business Horizons* 61:577–86. doi: 10.1016/j.bushor.2018.03.007.
- Jock, A. A., M. Ibrahim, S. K. Nuhu, and A. J. Anietie. 2022. "Preparation Of Activated Carbon Adsorbent From Coconut Husk For The Adsorption Of Lead (Ii) Ions From Aqueous Solution."

Nigerian Journal of Tropical Engineering 16. doi: 10.59081/njte.16.1.001.

Jokić, Ivana, Zoran Djurić, Miloš Frantlović, Katarina Radulović, Predrag Krstajić, and Zorana Jokić. 2012. “Fluctuations of the Number of Adsorbed Molecules in Biosensors Due to Stochastic Adsorption-Desorption Processes Coupled with Mass Transfer.” *Sensors and Actuators, B: Chemical* 166–167:535–43. doi: 10.1016/j.snb.2012.03.004.

Kim, Jong Gook, Hye Bin Kim, and Kitae Baek. 2023. “Novel Electrochemical Method to Activate Biochar Derived from Spent Coffee Grounds for Enhanced Adsorption of Lead (Pb).” *Science of the Total Environment* 886. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163891.

Ly, Dang Ngoc. 2022. “Adsorption of Pb<sup>2+</sup> Ions in Aqueous Solution by Activated Carbon.” *Asian Journal of Applied Science and Technology* 06:39–46. doi: 10.38177/ajast.2022.6306.

Prabakaran, R., M. Ajithkumar, C. Kamatchi, and S. Ganapathi. 2024. “Role of Powdered Activated Carbon in the Adsorption Behaviour of Hazardous Lead (Pb) Using PDAC as an Adsorbent.”

Rodríguez-Narciso, Silvia, Juan Antonio Lozano-Álvarez, Rogelio Salinas-Gutiérrez, and Netzahualcóyotl Castañeda-Leyva. 2021. “A Stochastic Model for Adsorption Kinetics.” *Adsorption Science and Technology* 2021. doi: 10.1155/2021/5522581.

- Sharma, Prabhakar, Abhilasha, Kumar Abhishek, Sayan Bhattacharya, Shubhalakshmi Sengupta, and Chandra Shekhar Seth. 2024. "Removal of Lead in Water by Potassium Hydroxide-Activated Biochar Developed from Syzygium Cumini Stem." *Discover Chemical Engineering* 4. doi: 10.1007/s43938-024-00056-7.
- Solmaz, Alper. 2024. "Adsorption of Methylene Blue and Eriochrome Black T onto Pinecone Powders (*Pinus Nigra* Arn.): Equilibrium, Kinetics, and Thermodynamic Studies." *Processes* 12. doi: 10.3390/pr12092044.
- Steimle, Lauren N., David L. Kaufman, and Brian T. Denton. 2021. "Multi-Model Markov Decision Processes." *IISE Transactions* 53:1124–39. doi: 10.1080/24725854.2021.1895454.
- Sugumar, Mohanasundaram, Selvaraj Bharathi, Venkatesan Sampath, Venkatesa Prabhu Sundramurthy, Mayakannan Selvaraju, Shine Kadaikunnan, and Jamal Mohammed Khaled. 2024. "Biosorption of Pb(II) Ions through Nanostructured Teff Straw Based Magnetized Activated Biocarbon: Aspects on Modeling, Optimization, and Kinetics." *Global Nest Journal* 26. doi: 10.30955/GNJ.06479.
- Yadav, Ashutosh, Abhay Raj, Diane Purchase, Luiz Fernando R. Ferreira, Ganesh Dattatraya Saratale, and Ram Naresh Bharagava. 2019. "Phytotoxicity, Cytotoxicity and Genotoxicity Evaluation of Organic and Inorganic Pollutants Rich Tannery Wastewater from a Common Effluent Treatment Plant (CETP) in Unnao District,



India Using *Vigna Radiata* and *Allium Cepa*.” *Chemosphere* 224:324–32. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.02.124.

Zhang, Zhen, Tao Wang, Huixue Zhang, Yonghong Liu, and Baoshan Xing. 2021. “Adsorption of Pb(II) and Cd(II) by Magnetic Activated Carbon and Its Mechanism.” *Science of the Total Environment* 757. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143910.



## **BÖLÜM 2**

### **ENDÜSTRİYEL YANGINLAR VE PATLAMALAR: ÖZELLİKLERİ, GÜVENLİK ÖNLEMLERİ, İSTATİSTİKLER VE YÖNETMELİKLER**

Dr. Fatma DİKÇAL AKARSU  
Yük. Müh. Halil DERTLİ  
Prof. Dr. Didem SALOĞLU DERTLİ

#### **GİRİŞ**

Herhangi bir ürünün veya eşyanın imalatı, işlenmesi, montajı, temizlenmesi, dağıtımı veya onarımı için ticari işletme olarak kullanılan veya kullanılması amaçlanan yapılar endüstriyel tesis olarak adlandırılmaktadır. Tekstil üretim, enerji üretim, gıda işleme, metal işleme, dolum ve boşaltım, kuru temizleme, kimya, maden işleme vb. tesisler, her türlü fabrika, bıçkımhaneler, çamaşırhaneler, rafineriler bu sınıfa girmektedir (WEB-1, 2024). Endüstriyel tesislerde büyük ölçekte gerçekleştirilen üretim, endüstriyel süreçler ve işleme esnasında kimyasal maddelerin kullanılması, yanıcı ve parlayıcı kimyasalların bulunması, bu kimyasalların fazla miktarda depolanması, taşınması aynı zamanda tesiste yüksek voltajlı enerji kullanılması gibi nedenlerden dolayı yangın riski büyük olan yerlerdir.

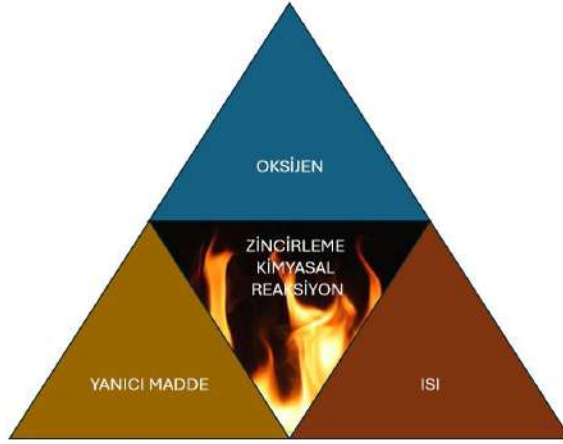
Tarım ve veteriner ilaçları, beşerî ilaç sanayi, sentetik gübreler, sentetik elyaflar, temizlik ürünleri, kozmetik ürünler, plastik hammaddeleri, boya, yardımcı maddeler, deri, tekstil, inşaat (boru, levha, kapı, pencere vb.), yapıştırıcı, derz, izolasyon malzemeleri,

fotoğraf malzemeleri, barut ve patlayıcılar gibi birçok sanayi alanında ürün sağlayan kimya sanayisinde yangın riski oldukça fazladır (Zarranejad A., 2015).

Ulusal Yangından Korunma Derneği (NFPA)'ın terimler sözlüğünde yangın; "patlamaları da içeren yıkıcı ve kontrolsüz herhangi bir yanma olayı" ve "kimyasal reaksiyon sonucu ışık, ısı ve yanma ürünlerinin değişime uğradığı oksidasyon süreci" olarak belirtilmektedir (NFPA, 2018). Bir yanma olayının meydana gelmesi için ortamda oksijen, yanıcı özelliği olan yakıt, ısı enerjisi ve zincirleme bir reaksiyon olması gerekmektedir (Şekil 1).

Yanma sürecinin başlaması için en az %16 oranında oksijen bulunması şarttır. Yakıt ise belli bir tutuşma sıcaklığına sahip katı, sıvı veya gaz halinde olabilen maddelerdir. Isı enerjisi, bu reaksiyonun tetikleyicisi olup, yakıt ile temas ettiğinde yanma reaksiyonunu başlatacak enerjiyi sağlar.

Bu bileşenler doğru oranda ve uygun koşullarda bir araya geldiğinde, kimyasal bir zincir reaksiyonu başlar ve bu reaksiyon, ortamda yakıt, oksijen ve ısı olduğu sürece devam eder. Bu zincirleme reaksiyon, ısı ve ışığın açığa çıkmasıyla sonuçlanan hızlı bir oksidasyon sürecidir (Underhill, 2019; Davletshina vd., 1998).



**Şekil 1:** Yanma reaksiyonu bileşenleri.

## 1.YANGIN VE YANGINLA MÜCADELE

### 1.1.Yanma Çeşitleri

Yanma olayı, yanmanın hızı, şiddeti ve ortaya çıkan ürünler açısından farklılık göstererek yavaş yanma, hızlı yanma, parlamaya ve patlamaya şeklinde yanma ile kendi kendine yanma olmak üzere dört temel kategoride incelenmektedir (Friedman, 1998).

**Yavaş Yanma:** Yavaş yanma, yanıcı maddenin, özellikle metallerin, havadaki oksijen ile düşük sıcaklıklarda birleşerek, gözle görülür alev, ısı veya ışık yaymadan gerçekleşen oksidasyon reaksiyonudur. Yavaş yanmanın bir diğer önemli örneği ise canlı organizmalarda gerçekleşen hücre solunumu olayıdır. Hücre solunumu sürecinde, glikoz gibi organik moleküller oksijen ile reaksiyona girerek karbondioksit, su ve enerjiye dönüşmektedir. Bu süreç, canlıların hayatta kalması için gerekli olan enerjinin elde edilmesini sağlamaktadır.

**Hızlı Yanma:** Hızlı yanma, yanıcı bir maddenin, katı halden sıvı hale geçerek veya doğrudan buharlaşarak, ortamda bulunan oksijen ile birleşmesi sonucu ortaya çıkan, ısı, ışık, alev ve korlaşma gibi belirgin fiziksel ve kimyasal değişimlerin eşlik ettiği egzotermik bir reaksiyon olarak tanımlanmaktadır. Bu süreçte, yanıcı madde moleküllerinin oksijen molekülleri ile çarpışmasıyla başlayan zincirleme bir reaksiyon meydana gelmektedir ve büyük miktarda enerji açığa çıkmaktadır. Yanma hızını etkileyen birçok faktör bulunmakla birlikte, yanıcı maddenin yapısı, partikül büyüklüğü, ortam sıcaklığı ve oksijen konsantrasyonu en önemli parametreler arasında yer almaktadır.

**Parlama ve Patlama:** Parlama ve patlama, yanma olaylarının farklı hız ve şiddette gerçekleşen iki önemli alt kategorisidir. Parlama, yanıcı bir maddenin, genellikle düşük bir enerji kaynağı ile temas etmesi sonucu kısa süreli olarak alev alması olayıdır. Bu süreçte, yanmanın devamı için gerekli olan yeterli miktarda yanıcı gaz biterek alev kendiliğinden sönmektedir. Patlama ise, yanıcı bir maddenin oksijen ile hızlı ve tam bir reaksiyona girmesi sonucu ani bir enerji açığa çıkması, basınç artışı ve çevreye madde yayılması ile karakterize edilen şiddetli bir yanma olayıdır. Patlamanın şiddeti, yanıcı maddenin türü, miktarı, fiziksel özellikleri, ortam koşulları ve oksijen konsantrasyonu gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir.

**Kendi Kendine Yanma:** Kendi kendine yanma, yavaş yanma sürecinin, dışarıdan bir ateşleme kaynağı olmaksızın, içsel ısı artışı ile hızlı yanmaya dönüşmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu süreç, özellikle organik maddelerde, normal hava koşullarında oksijen ile yavaşça

reaksiyona girerek ısı üretmeleriyle başlamaktadır. Üretilen ısı, zamanla birikerek maddenin tutuşma noktasına ulaşmasına neden olmakta ve sonuç olarak kendiliğinden alev almasına yol açmaktadır (Lemkowitz vd., 2014).

## 1.2. Yangın Sınıfları ve Yangın Söndürücüler

Yangın sınıfları TS EN 2 ve TS EN 2/A1 Türk Standartlarına göre A, B, C ve D olarak 4 sınıfa ayrılmıştır (WEB-2, 2024). Avrupa standartlarına göre A1, A2, B, C, D, E, F olmak üzere 7 sınıfa ayrılmıştır (PU Europe Fire Safety Handbook, 2020). Ulusal Yangından Korunma Derneği (NFPA) ise yangınları A, B, C, D ve K olmak üzere 5 sınıfta değerlendirmiştir. (WEB-3, 2024) Bazı Türkçe kaynaklarda ise yangın sınıflandırma A, B, C, D ve F olmak üzere 5 sınıfta gösterilmiştir (İnce, 2019).

**A sınıfı:** A sınıfı yangınlar, esas itibarıyla organik yapıda olan ahşap, kumaş, kağıt, tekstil, çöp ve plastik gibi katı maddelerin yanması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu tür yanmalarda, karbon bileşiklerinin oksijenle birleşmesiyle yanma reaksiyonu gerçekleşmektedir ve sonuç olarak kül oluşmaktadır. A sınıfı yangınların söndürülmesinde, genellikle monoamonyum fosfat içeren kuru kimyasal toz veya su gibi soğutucu maddeler kullanılmaktadır. Su, yanma reaksiyonunu yavaşlatarak ve yanıcı maddenin sıcaklığını düşürmektedir. Monoamonyum fosfat ise hem soğutma hem de boğma etkisi göstermektedir.

**B Sınıfı:** B sınıfı yangınlar, su ile karışabilen (vernük, tiner, alkol, aseton gibi) ve karışamayan (benzin, mazot, madeni yağlar gibi) organik çözücülerin buharlarının hava ile karışarak tutuşması sonucu meydana gelmektedir. Bu tür yangınlar, oksijeni kesmek amacıyla köpük veya toz söndürücüler kullanılmak suretiyle söndürülmektedir.

**C sınıfı:** C sınıfı yangınlar, hidrokarbon gazların veya sıvılaştırılmış petrol gazlarının buharlarının hava ile uygun oranlarda karışarak ateşlenmesiyle meydana gelen yangınlardır. Bu tür yangınlar, gaz beslemesinin kesilmesi ve yangın bölgesinin soğutulması yoluyla söndürülebilmektedir. Gaz beslemesi kesilmesinden sonra kuru kimyevi toz söndürücüler kullanılarak yangının tamamen söndürülmesi sağlanabilmektedir.

**D sınıfı:** D sınıfı yangınlar, titanyum, magnezyum, alüminyum, sodyum ve potasyum gibi aktif metallerin hava veya su ile temas etmesi sonucu meydana gelen egzotermik reaksiyonlar neticesinde oluşmaktadır. Bu tür yangınlarda, suyun kullanılması reaksiyon hızını artırarak yangının şiddetlenmesine neden olacağından kesinlikle kaçınılmalıdır. D sınıfı yangınları söndürmek için özel olarak formüle edilmiş kuru kimyasal tozlar kullanılmaktadır. Bu tozlar, yanma reaksiyonunu yavaşlatarak, ısıyı emerek ve oksijenin alev ulaşmasını engelleyerek yangının kontrol altına alınmasını sağlamaktadır.

Bu yangın türleri dışında elektrikten kaynaklı yangınlar da meydana gelebilmektedir. Elektrik yangınları herhangi bir sınıfa dahil edilebileceği için kendi sınıfları verilmez. Çünkü elektrik akımıyla tutuşan elektrik değil bunu çevreleyen malzemedir. Elektrik bir



yakıttan daha fazla bir tutuşma kaynağı oluşturabilmektedir. Bu tür yangınlarda su veya başka bir iletken kullanılmamalıdır. Öncelikle güç kaynağı kapatılmalı sonrasında kuru kimyevi tozla müdahale edilmelidir (PVA, 2005).

### **1.3. Yangın Söndürme Prensipleri ve Usulleri**

Yangın söndürme işlemi, yanmanın üç temel unsuru olan yanıcı madde, oksijen ve ısıdan en az birinin ortadan kaldırılması veya kesilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu amaçla, yanan cismin oksijenle temasının kesilerek boğulması, yanan maddenin ısısının düşürülerek soğutulması, yanıcı maddenin doğrudan yok edilmesi veya yanma reaksiyonunun kimyasal zincirini keserek durdurulması gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Her bir yangın türü için farklı söndürme maddeleri ve teknikleri uygulanmakla birlikte, temel amaç her zaman yanmanın devamı için gerekli olan koşulları ortadan kaldırmaktır (ABS, 2017).

**Havayı kesme (yangını boğma):** Katı yakıtlı yangınlarda kum, toprak veya halı gibi malzemelerle, kimyasal madde kaynaklı yangınlarda ise köpük veya inert gazlar (örneğin azot) kullanılarak veya her iki tür yangında yangın battaniyesi ile yanan materyalin hava ile teması kesilerek yapılan söndürme yöntemidir. Atmosferdeki oksijen konsantrasyonunun yaklaşık %16'ya düşürülmesiyle çoğu yanma reaksiyonu durdurulabilmektedir. Bu yöntem, yangın söndürme teknikleri arasında yaygın olarak kullanılan ve etkili olduğu kabul edilen bir stratejidir.

**Soğutma:** Soğutma, yanma reaksiyonunun devamı için gerekli olan enerjiyi azaltarak yangını söndürme prensibine dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemde, yanıcı maddenin sıcaklığı, tutuşma noktasının altına düşürülerek yanma reaksiyonu durdurulmaktadır. Yanıcı maddenin dağıtılması veya söndürücü madde püskürtülmesi gibi çeşitli tekniklerle soğutma gerçekleştirilebilir. Ancak, suyun yüksek özgül ısı kapasitesi nedeniyle yaygın olarak kullanılan bu yöntem, yağ ve akaryakıt gibi hidrokarbon bazlı sıvılar üzerindeki yangınlarda, bu maddelerin yoğunluğundan dolayı yangının yayılmasına neden olabileceği için sınırlı etkinlik göstermektedir.

**Yangın kaynağını ortadan kaldırma:** Yangın kaynağının ortadan kaldırılması, yanma reaksiyonunun sürdürülebilmesi için gerekli olan yakıtın (yanıcı madde) ortamdan uzaklaştırılması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemde, sıvı veya katı haldeki yanıcı maddeler toplanarak güvenli bir alana taşınırken, gaz halindeki yanıcı maddeler ise havalandırma yoluyla seyreltilerek söndürme işlemi gerçekleştirilmektedir.

**Reaksiyon sönümlenme:** Reaksiyon sönümlenmesi, egzotermik reaksiyonların ısı ve alev üretimini engelleyerek yangının yayılmasını durduran bir yöntemdir. Halojenli alkil bileşikleri, köpükler ve suya katılan kimyasallar gibi söndürücüler, zincir reaksiyonlarını kırma, oksijen konsantrasyonunu düşürme, ateşi boğma veya yanıcı maddeyi soğutma gibi mekanizmalarla yangını söndürmektedir. Yangın türü ve şiddetine göre en uygun söndürücü seçilmelidir (New Zeland Fire Services, 2009).

## **2. ENDÜSTRİYEL YANGINLAR VE PATLAMALAR**

Endüstriyel yangınlar ve patlamalar, endüstriyel tesislerin üretim süreçlerinde veya depolama alanlarında yanıcı maddelerin, enerji kaynaklarının veya kimyasal reaksiyonların kontrolsüz bir şekilde bir araya gelmesi sonucu ortaya çıkan, işletmelerde büyük çaplı hasarlara ve kayıplara yol açabilen olaylardır. Yanıcı sıvılar, gazlar, tozlar ve katı maddeler, bu tür olayların en sık karşılaşılan nedenleri arasında yer almaktadır. Elektriksel arızalar, mekanik hasarlar, yanlış kullanım veya sıcaklık artışları gibi faktörler de yangın ve patlamaları tetikleyebilmektedir. Bu tür olayların önlenmesi ve etkilerinin azaltılması için, risk değerlendirmesinin yapılması, güvenlik önlemlerinin alınması, acil durum planlarının hazırlanması ve çalışanların eğitilmesi büyük önem taşımaktadır. Endüstriyel yangınlar ve patlamaların sonuçları arasında can kayıpları, yaralanmalar, mal kayıplar, çevresel kirlilik ve üretim süreçlerinin durması gibi olumsuz etkiler yer almaktadır. Bu nedenle, endüstriyel tesislerde yangın ve patlama risklerinin belirlenmesi, önlenmesi ve yönetilmesi için kapsamlı güvenlik önlemleri alınması büyük önem taşımaktadır (Yılmaz, 2023).

### **2.1. Endüstriyel Yangınların ve Patlamaların Sebepleri**

Endüstriyel tesisler normal yaşam alanlarından farklı olarak daha fazla yangın ve patlama riski taşıyan yerlerdir. Bu nedenle yangınlar ve patlamalar en çok endüstriyel tesislerde meydana gelmektedir. Kontrolsüz bir şekilde başlayan, kuruluş içerisinde veya çevresinde büyük hasara hatta can kaybına neden olan bir veya birden

fazla tehlikeli maddenin sebep olduğu endüstriyel yangınlar ve patlamalar son derece tehlikelidir. (Kondashov vd., 2024) Endüstriyel yangın ve patlamaların çoğu insan kaynaklı olup ihmal, bilgisizlik ve tedbirsizlikten kaynaklanmaktadır. Bunlara bağlı olarak endüstriyel yangın ve patlamaların en yaygın beş nedeni şunlardır:

**Yanıcı Toz:** Yanıcı tozlar, hava veya diğer oksitleyici ortamlarda asılı halde bulduklarında, belirli bir konsantrasyonda tutuşma ve patlama riskini barındıran, ince parçacıklı katı maddelerdir. Gıda endüstrisindeki un, şeker, nişasta gibi organik maddeler, ilaç sanayindeki kimyasallar ve metal işleme sektöründeki alüminyum, magnezyum gibi metallerin tozları, sıkça karşılaşılan yanıcı toz örnekleri arasında yer almaktadır. Yanıcı toz patlamaları, genellikle birincil ve ikincil olmak üzere iki aşamada gerçekleşmektedir. Birincil patlama, toz bulutunun oluşmasına ve tutuşmasına neden olurken, ikincil patlama ise daha büyük bir alanda ve daha şiddetli bir şekilde meydana gelmektedir. Bu tür patlamalar, endüstriyel tesislerde ciddi hasarlara ve can kayıplarına yol açabilecek potansiyele sahiptir. Yanıcı toz patlamalarını önlemek için; düzenli toz temizliği ve kontrolü, etkili toz toplama sistemlerinin kullanımı, tutuşturma kaynaklarının ortadan kaldırılması, mekanik ve statik elektrik kaynaklı kıvılcımların engellenmesi, patlama basıncını azaltacak havalandırma sistemleri veya patlama kapaklarının kullanımı gibi önlemler alınması gerekmektedir (Eckhoff, 2003).

**Sıcak İş:** Sıcak iş, yüksek sıcaklık üreten ve dolayısıyla yangın riskini artıran bir dizi endüstriyel faaliyeti kapsamaktadır. Taşlama, kaynak,

kesme gibi işlemler sırasında oluşan kıvılcımlar, yüksek sıcaklıktaki yüzeyler ve erimiş malzemeler, iş ortamında bulunan yanıcı maddelerle temas ettiğinde yangınlara neden olabilmektedir. Makinelerin hareketli parçaları, ısıtma sistemleri, egzoz sistemleri gibi ekipmanlar da potansiyel ısı kaynakları olarak değerlendirilmelidir. Bu riskleri minimize etmek için, sıcak iş yapan personelin gerekli eğitimi almış olması, kişisel koruyucu donanımları kullanması, yanıcı maddelerin iş sahasından uzaklaştırılması, sıcak işlerin yapılacağı alanın izole edilmesi ve güvenlik uzmanları tarafından sürekli denetim yapılması gerekmektedir. Özellikle yanıcı madde depolanan tesislerde sıcak işlerin mümkün olduğunca sınırlandırılması veya alternatif yöntemlere başvurulması büyük önem taşımaktadır (Akano vd., 2024).

**Yanıcı Sıvı ve Gaz:** Yanıcı sıvı ve gazların yoğun olarak kullanıldığı tesislerde yangın riski daha fazladır. Bu maddeler, çeşitli kaynaklardan çıkan kıvılcımlarla tutuşabilmekte veya mevcut yangınları körükleyebilmektedir. Bu riski azaltmak için, söz konusu kimyasalların özellikleri, depolama koşulları ve potansiyel tehlikeleri hakkında detaylı bilgi sahibi olunması, Malzeme Güvenlik Bilgi Formlarına (MSDS) titizlikle uyulması ve tüm olası ateşleme kaynaklarının yanıcı maddelerden uzak tutulması gerekmektedir (Zakel vd., 2019). Bu tür tesislerde can ve mal güvenliğini sağlamak adına, "Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik" (Resmi Gazete Sayı: 28328) ve "Muhtemel Patlayıcı Ortamlarda Kullanılan Teçhizat ve Koruyucu Sistemler İle İlgili Yönetmelik" (Resmi Gazete Sayı: 26392) gibi düzenlemelere sıkı

sıkıya uyulması ve kişisel koruyucu donanımların (KKD) kullanılması gerekmektedir.

**Ekipman ve Makine Kusurları:** Ekipman ve makinelerin yanlış kurulumu, yetersiz bakım veya hatalı kullanım, endüstriyel yangınların önemli bir nedenidir. Özellikle sıcak işleme ve ısıtma sistemlerindeki ekipmanlar, uygun önlemler alınmadığında yangın riskini artırmaktadır. Görünüşte zararsız olan makineler bile, düzenli bakım ve kontrol mekanizmalarının eksikliği durumunda potansiyel bir tehdit haline gelebilmektedir. Bu riski azaltmak için, işletme çalışanlarının makine çalışma prensipleri konusunda eğitilmesi, periyodik bakım ve kontrol çalışmalarının gerçekleştirilmesi, ekipmanların temizliğinin sağlanması ve aşırı ısınmanın önlenmesine yönelik önlemlerin alınması gerekmektedir (Bourassa vd., 2016).

**Elektrik Ekipmanları:** Üretim tesislerinde elektrik yangınları sıklıkla görülmektedir ve genellikle standartlara uygun olmayan kablolama, aşırı yüklenmiş prizler, uzatma kabloları, yanıcı maddelere yakın konumlandırılmış elektrik trafoları ve panoları, aşırı yüklenmiş devreler, elektrikli ısıtıcılar ve statik elektrik deşarjları gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Bu gibi elektriksel tehlikelerden kaynaklanan bir kıvılcım, yanıcı tozların, yanıcı sıvıların ve gazların tutuşmasına sebep olabilmektedir. Elektrik kaynaklı yangınları önlemek için, tesis içerisindeki motorlar, havalandırma sistemleri ve aydınlatma armatürleri dahil olmak üzere tüm elektrikli ekipmanların patlamaya dayanıklı (Ex-proof) standartlara uygun olması gerekmektedir. Ayrıca, tesis içinde gerçekleştirilecek tüm elektrik onarım, montaj ve bakım

işlemlerinin yetkili kişiler tarafından titizlikle yapılması, topraklamaya özellikle dikkat edilmesi, düzenli denetim ve bakımların yapılması gerekmektedir (Xu vd., 2024).

Bunların dışında yangın bölmelerinin yetersizliği veya yanıcı yapı malzemeleri gibi yapısal kusurları, yanlış kullanım ve depolamadan kaynaklı piroforik maddelerin kendiliğinden tutuşma eğilimi, insan hataları veya ekipman arızalarından kaynaklanan iş kazaları, komşu işyerlerindeki yangınların sirayeti, sabotaj, doğal afetler, dikkatsizlik, yetersiz eğitim veya güvenlik prosedürlerine uyulmaması gibi birçok yangınların oluşmasına neden olmaktadır (Hassanain vd., 2022).

## **2.2. Endüstriyel Yangın ve Patlama Esnasında ve Sonrasında Oluşacak Tehlikeler**

Endüstriyel yangın ve patlama olayları, ani yıkımın ötesinde, olay esnasında ve sonrasında bir dizi tehlikeyi de beraberinde getirmektedir. Yangın sırasında oluşan yoğun duman ve toksik gazlar solunum yollarını tahriş ederek nefes darlığı, boğulma ve ciddi solunum rahatsızlıklarına yol açabilmektedir. Yangında oluşan duman, kimyasal buharlar ve partiküller gözlerde tahrişe neden olabilmekte, bu da geçici veya kalıcı görme kaybına yol açabilmektedir. Yangın veya patlama sırasında hasar gören elektrik hatları ve ekipmanlar elektrik çarpması riskini artırmaktadır. Yangın sırasında ve sonrasında tesisin faaliyet alanına göre karbon monoksit (CO), hidrojen siyanür (HCN), kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>), azot oksitler (NO<sub>x</sub>), hidrojen klorür (HCl) gibi toksik gazlar salınabilmektedir. Bu gazlar hem olay yerindekiler hem de

çevredeki halk için ciddi sağlık riskleri oluşturmaktadır. Yangın esnasında patlamamış tanklar, hasarlı boru hatları veya varillerden sızan yanıcı sıvı ve gazlar aşırı ısınma sonrası patlayarak ikincil bir patlama riski taşıyabilmektedir. Yangın ve patlamanın şiddeti, tesisin yapısal bütünlüğünü bozarak çökmesine ve can kayıplarına yol açabilmektedir. Havada asılı kalan yanıcı tozlar veya buharlar, ani ve şiddetli patlamalara neden olabilmektedir. Yangının ani bir şekilde tüm yanıcı maddeleri tutuşturmasıyla oluşan geri tepme, ortam sıcaklığını hızla artırarak can kayıplarına ve ciddi yanıklara neden olabilmektedir. Yangının veya patlamanın kontrol altına alınamadığı durumlarda, yangın komşu tesislere sıçrayarak daha büyük çaplı bir felakete yol açabilmektedir. Yangın ve patlama sonrası tesisin faaliyetlerinin durması, ekonomik kayıplara ve iş kesintilerine yol açmaktadır. Tesisinin faaliyet alanına göre yangın ve patlama sonucu oluşan toksik gazlar, kimyasal sızıntılar ve partiküller hava, su ve toprak kirliliğine neden olabilmektedir. Yangın kaynağına bağlı olarak karbon monoksit (CO), hidrojen siyanür (HCN), kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>), azot oksitler (NO<sub>x</sub>), fosfor pentoksit (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), hidrojen klorür (HCl), hidrojen florür (HF), hidrojen bromür (HBr), akrolein, formaldehit gibi tahriş edici ve boğucu gazlar ile polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'ler), dioksinler ve dibenzofuranlar gibi organik kirleticiler salınabilmektedir. Bu tehlikeler, yalnızca olay yerindekileri değil, çevredeki halkı ve çevreyi de etkilemektedir (Griffiths, 2018).



### 2.3. Endüstriyel Yangın ve Patlama Yönetim Stratejileri

Endüstriyel yangın ve patlama yönetim sistemi, tesis içindeki tüm paydaşların iş birliği ve katılımını gerektiren, sistematik ve sürekli bir süreçtir. Bu süreç, risk değerlendirmesi, planlama, organizasyon, kontrol, izleme ve gözden geçirme olmak üzere temel altı aşamadan oluşmaktadır.

**Risk Değerlendirmesi ve Analizi:** Endüstriyel yangın ve patlama risk değerlendirmesi, endüstriyel tesislerdeki potansiyel tehlikeleri belirlemeyi, değerlendirmeyi ve azaltmayı amaçlayan süreç güvenliği yönetiminin önemli bir bileşenidir. Kapsamlı analizler, proses koşulları, malzeme özellikleri, ekipman bütünlüğü ve insan faktörleri gibi detaylı değerlendirmeleri içermektedir (Sengupta vd., 2016).

Büyük endüstriyel kazaların önlenmesi amacıyla risklerin büyüklüğünün ve olasılığının belirlemesi(risk değerlendirmesi), bir sürecin tasarımı, işletimi ve bakımı sırasında oluşabilecek tehlikelerin önlenmesi veya etkilerinin azaltması (proses güvenliği), bir sistemdeki tasarımın veya işletimde beklenmeyen durumların sistematik bir şekilde belirlenmesi ve değerlendirilmesi (tehlike ve operasyonellik çalışmaları, HAZOP), istenmeyen bir olayın (örneğin, bir patlama) meydana gelmesine neden olabilecek tüm olası hataları ve bunların birbiriyle olan ilişkilerini gösteren mantıksal bir diyagramın oluşturulması (hata ağacı analizi, FTA), bir başlangıç olayından başlayarak, bu olayın sonuçlanabileceği farklı yolları ve olasılıklarını gösteren bir diyagram oluşturulması, kaza senaryolarının modellenmesi, risklerin nicel olarak değerlendirilmesi ve acil durum

planlarının geliştirmesi (olay ağacı analizi, ETA) uygun önlemlerin alınması açısından büyük önem taşımaktadır. (AIChE, 2008), (Er vd., 2024), Bu değerlendirmeler, mühendislik kontrolleri, idari prosedürler ve acil durum müdahale planları dahil olmak üzere etkili güvenlik önlemlerinin geliştirilmesine temel oluşturmaktadır.

Türkiye, Avrupa Birliği tarafından kabul edilen Seveso direktiflerine uyum süreci çerçevesinde, Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik (BEKRA) kapsamında işletmecilerin, kuruluşlarında potansiyel tehlikelerden kaynaklanan riskleri önlemekle ve bu riskleri, risk değerlendirmesi doğrultusunda kabul edilebilir bir seviyeye indirmekle yükümlü olduğunu belirtmektedir (ÇSB-BEKRA, 2013).

Endüstriyel tesislerde yangın güvenliği yönetimi, potansiyel tehlikelerin sistematik bir şekilde belirlenmesi, risk altındaki kişilerin tanımlanması, risklerin önceliklendirilmesi ve azaltılması, güvenlik önlemlerinin belgelenmesi, acil durum planlarının oluşturulması, çalışan eğitimleri ve risklerin düzenli olarak gözden geçirilmesi gibi aşamalardan oluşmaktadır. Bu süreçte, açık alevler, yanıcı malzemeler, ısıtıcılar, yapısal özellikler, çalışma süreçleri, çevresel riskler ve ikincil riskler gibi tüm potansiyel tehditler değerlendirilmelidir. Risklerin önceliklendirilmesi, olası senaryoların sıklık ve etki derecelerine göre yapılmalı ve yüksek riskli durumlar için spesifik önlemler alınmalıdır. Risk değerlendirme sürecinin tüm aşamaları belgelenmelidir ve çalışanlara eğitimler verilmelidir. Tesislerde meydana gelen değişiklikler nedeniyle risk değerlendirmelerinin düzenli olarak

güncellenmesi etkin bir yangın güvenliği yönetimi için gereklidir (FEMA, 2018).

**Planlama:** Endüstriyel tesislerde olası yangın ve patlama risk değerlendirmesi sonuçlarına göre, yangın ve patlama güvenliği planlarının hazırlanması gerekmektedir. Bu güvenlik planlaması, olası bir yangın veya patlama durumunda alınacak önlemleri, görevlendirmeleri ve acil durum prosedürlerini detaylı bir şekilde açıklayan kapsamlı bir dokümandır (Jönsson Johan vd., 2000). Bu dokümanda yangının nasıl çıkabileceği, nasıl yayılabileceği ve nasıl söndürüleceği konularının da dahil olduğu planda acil durum senaryoları, tahliye planları iletişim protokolleri ve çalışan eğitimleri de yer alması gerekmektedir. Yangın alarm sistemleri, söndürme sistemleri, acil durum çıkışları ve toplanma alanları gibi fiziksel önlemlerin yanı sıra, çalışanların görevleri ve sorumlulukları da bu planlarda net bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Planın uygulanabilirliği ve etkinliği ise düzenli yapılan denetimlerle, tatbikatlarla ve güncellemelerle sağlanmalıdır. İyi hazırlanmış bir yangın ve patlama güvenliği planı, can ve mal kayıplarını minimize etmenin yanı sıra yangının büyümesini engellemeye yardımcı olmaktadır (HSE, 2022).

**Organizasyon:** Endüstriyel tesislerde yangın ve patlama güvenliği yönetiminin etkinliği, sadece planlama ve fiziksel önlemlerle değil, aynı zamanda organizasyonel yapının da sağlam temellere oturtulmasıyla mümkün olmaktadır. Organizasyon süreci, tesis içindeki tüm yangın güvenliği faaliyetlerinden sorumlu olan yangın güvenliği

sorumlusunun belirlenmesini, ilk yardım, yangın söndürme ve tahliye prosedürleri konusunda yeterli bilgi ve beceriye sahip olan yangının büyümesini engelleyen, çalışanları tahliyesinden sorumlu olan yangın ekibi üyelerinin belirlenmesini, bakım-onarım ekibi, üretim çalışanları, güvenlik görevlileri gibi tüm personele yangın güvenliği eğitimleri verilmesini ve yangın durumunda hızlı ve etkili bir müdahale için etkili bir iletişim sistemi kurulmasını içermelidir. Endüstriyel tesislerde iyi bir organizasyonel yapı, yangın ve patlama risklerini en aza indirmek ve olası bir yangın veya patlama durumunda hızlı ve etkili bir müdahale sağlamak için hayati öneme sahiptir (Santos-Reyes vd., 2001).

**Kontrol:** Endüstriyel tesislerde yangın ve patlama güvenliği yönetiminin dördüncü ve kritik aşaması olan kontrol, belirlenen yangın ve patlama güvenliği önlemlerinin etkin bir şekilde uygulanıp uygulanmadığının düzenli olarak denetlenmesini içermektedir. Bu süreç, tesis içindeki tüm yangın güvenliği unsurlarının sürekli olarak gözden geçirilmesini ve iyileştirilmesini, yangın söndürme sistemlerinin, acil çıkış yollarının, yangın alarm sistemlerinin ve çalışan davranışlarının düzenli olarak denetlenmesini sağlamaktadır.

Yangın söndürme sistemlerinin periyodik bakımları yapılması, basınç testleri ve püskürtme testleri ile sistemlerin her zaman çalışır durumda olması, acil çıkış yollarının açıklığı, aydınlatmaların ve işaretleme levhalarının uygun ve yeterli olması yapılan kontrollerle garantiye alınmalıdır. Yangın alarm ve erken uyarı sistemlerinin hassasiyeti ve işlevselliği düzenli aralıklarla test edilmelidir (Duma vd., 2021).

Çalışanların yangın ve patlama güvenliği konusunda ne kadar bilgi sahibi olduğu ve yangın durumunda nasıl davrandığı, düzenli yangın tatbikatları ve eğitimlerle değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu sayede, çalışanların bilgi ve becerileri geliştirilerek yangın güvenliği kültürü tesis içinde yerleştirilmelidir. Denetim ve değerlendirme sonuçlarına göre, yangın güvenliği sistemlerindeki eksiklikler ve çalışan performansındaki zayıflıklar belirlenmelidir. Bu eksiklikleri gidermek için yeni ekipman alımı, mevcut ekipmanların tamir edilmesi, prosedürlerin değiştirilmesi veya ek eğitimler verilmesi gibi iyileştirme çalışmalarına başvurulmalıdır. Düzenli kontrol süreçleri yangın ve patlama risklerini en aza indirerek, çalışanların güvenliğini sağlamakta ve iş sürekliliğini desteklemektedir (Seçer vd., 2006).

**İzleme:** Yangın güvenliği yönetiminin izleme aşaması, alınan önlemlerin etkinliğinin sürekli olarak değerlendirilmesi, potansiyel risklerin belirlenmesi ve sistemin genel performansının geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilen sistematik bir süreçtir. Bu süreçte, önceden belirlenen güvenlik önlemlerinin uygulanıp uygulanmadığının düzenli olarak denetlenmesi, olası eksikliklerin tespit edilmesi ve gerekli iyileştirmelerin yapılması gerekmektedir. Ayrıca, meydana gelen yangın olaylarının nedenleri detaylı bir şekilde araştırılarak, benzer olayların tekrarını önleyecek etkili önlemler alınmalıdır. Yangın güvenliği sistemleri, gelişen teknoloji ve değişen koşullara uyum sağlanması amacıyla sürekli olarak güncellenmeli ve geliştirilmelidir. Tüm bu süreçler, yangın güvenliği ile ilgili kapsamlı kayıtların tutulması ve düzenli olarak analiz edilmesi ile desteklenmelidir. Bu

sayede, yangın güvenliği sistemi sürekli olarak iyileştirilerek, potansiyel riskler minimize edilmekte ve çalışanların güvenliği artırılmaktadır. Ayrıca, izleme süreci, kuruluşun yangın güvenliği kültürünü güçlendirerek, tüm çalışanların yangın güvenliği konusundaki farkındalığını artırmakta ve proaktif bir yaklaşım benimsemelerini teşvik etmektedir (Davletshina, 1998).

**Gözden Geçirme:** Yangın güvenliği yönetim sisteminin gözden geçirme aşaması, sistemin etkinliğinin sürekli olarak iyileştirilmesi ve geliştirilmesi amacıyla yapılan kapsamlı bir değerlendirme sürecidir. Bu süreç, önceki aşamalarda belirlenen eksikliklerin ve iyileştirme alanlarının tekrar değerlendirilmesini, yeni risklerin ve tehditlerin belirlenmesini ve bunlara karşı alınacak önlemlerin planlanmasını içermektedir. Bunun yanında süreçte, yasal düzenlemelerdeki değişiklikler yakından takip edilerek sistemin bu değişikliklere uygun hale getirilmesi, düzeltici ve önleyici faaliyetlerin etkinliğini artırılması ve bu faaliyetlerin takibi için bir sistem oluşturulması, sistemin sürekli olarak güncel ve etkin kalması sağlanmaktadır. Bu sayede, yangın güvenliği yönetim sistemi, dinamik yapısıyla değişen koşullara uyum sağlayabilmekte ve olası risklere karşı daha etkili bir şekilde korunma sağlayabilmektedir (Furness vd., 2007).

## **2.4. Endüstriyel Yangın ve Patlama Güvenlik Önlemleri**

Endüstriyel tesislerde yangın ve patlama güvenliği önlemleri kapsamında tesisin yapısı, üretim veya işlenen malzemenin türü, riskler ve tehlikeler, risklere karşı alınacak önlemler, aktif ve pasif yangın

güvenlik önlemlerini, acil durum planını, acil durum müdahale yöntemleri işveren ve bütün çalışanlar tarafından eşit düzeyde bilinmelidir (Schroll, 2002).

**Aktif Yangın Güvenlik Önlemleri:** Aktif yangın güvenlik önlemleri, bir yangın başladığında tetiklenen yanıt sistemlerini ve alevle mücadele yöntemlerini içermektedir. Aktif sistemler yangını kısıtlayıcı hatta söndürücü etki göstermektedir. Örneğin, elle çalıştırılan bir yangın söndürücüde, programlanmış bir sprinkler sistemi aktif bir yanıt olarak nitelendirilebilir. Bu sistemler, yangınları söndürmek ve dumanın yayılmasını kontrol etmek için proaktif bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Aşağıdaki listede aktif yangın güvenlik önlemlerinin büyük bir kısmı bulunmaktadır:

- İtfaiyeciler
- Yangın battaniyeleri
- Sprinkler sistemleri
- Duman alarmları
- Acil hizmetler
- Otomatik yangın kapıları
- Otomatik söndürme sistemleri
- Termal dedektörler
- Yangın kontrol sistemleri
- Bina içi yangın hortum dolabı sistemleri
- Bina dışı yangın hortum dolabı (hidrant) sistemleri
- Su püskürtme sistemleri
- Sulu-köpüklü püskürtme sistemleri (Evans vd., 2005).

**Pasif Yangın Güvenlik Önlemleri:** Pasif koruma, yangına dayanıklılık önlemlerini ifade etmektedir. Bu sistemler, her şeyden önce alevin yayılmasını önlemek ve tutuşmaya direnmekle ilgilidir. Bu direnç genellikle yapısaldir ve binanızı bölümlere ayırmak ve bir alevi izole etmek için tasarlanmıştır. Pasif yangından korunma hem tesisin güvenliği hem de tesiste oluşabilecek hasarın en aza indirilmesi açısından önemlidir. Etkili bir bölümlendirme işlemiyle yangın esnasında tesisin yapısal bütünlüğünü korunabilmekte ve çalışanların güvenli tahliyesini sağlanabilmektedir. Aşağıda pasif yangın güvenlik önlemlerine örnekler bulunmaktadır;

- Yangın kapıları
- Yangın duvarları
- Yangın zeminleri
- Acil çıkış ışıkları
- Amortisörler
- Alev kalkanları
- Şişen boya
- Harç kaplama
- Mineral elyaf paspas
- Toplanma/sığınma noktalarının korunması
- Sprey yanmazlık
- Yangın bölmeleri (Carino vd., 2005).



## 2.5. Endüstriyel Tesislerde Yangın ve Patlamaya Müdahale

**Müdahale ve Söndürme:** Endüstriyel tesislerde meydana gelen yangın ve patlamalarda can kaybı, sakatlık, yaralanma, tesisin uğradığı zararın dışında çevresel hasarlar, ekonomik zararlar, iş gücü kaybı, itibar kaybı, pazar kaybı gibi daha birçok doğrudan veya dolaylı kayıplar yaşanmaktadır. Büyük yangınlar ve patlamalardan sonra tesisin yeniden faaliyete geçmesi genellikle mümkün olmamaktadır. Bu nedenle endüstriyel yangın güvenliği açısından tesislerde proaktif yaklaşıma önem verilerek yangının oluşmasını sağlayacak her türlü riskin azaltılması veya yok edilmesi en makul olanıdır. Lakin bu yine de endüstriyel kazaları tamamen ortadan kaldırmak mümkün değildir. Tesislerde ağır iş makinelerinin bulunması, büyük depolama tanklarının varlığı, yangını besleyebilecek kimyasalların varlığı (Yağ, benzin, organik solvent ve diğer yanıcı sıvılar), ani parlama veya patlama olasılığı ve sonuç olarak yangının bütün tesisi hızlı bir şekilde saracağı düşünüldüğünde bu durum oldukça rahatsız edici hal almaktadır.

Endüstriyel tesisler çoğunlukla özel önlem ve müdahale yöntemi gerektiren farklı kimyasallar içermektedir. Bu nedenle endüstriyel tesiste bulunan her çalışan kullanılan malzemelerin özellikleri, tehlikeleri, depolanma şekilleri ve herhangi bir afette kimyasalların olası etki ve tepkileri konusunda yeterince eğitilmesi gerekmektedir.

Endüstriyel tesislerde yangın esnasında kimyasallara müdahale yöntemi en can alıcı kısımdır. Tesiste yangından henüz etkilenmemiş taşınabilir kimyasalların uzaklaştırılması veya korunması yangının büyümesini, patlama riskini veya zehirli gaz salınımını durdurabilir

lakin bu müdahaleyi yapmak oldukça tehlikeli olabilmektedir. Çünkü yangın esnasında meydana gelebilecek ikincil bir kaza can kaybına neden olabilir. Bu müdahalelerin uzmanlarca yapılması elzemdir. İtfaiye ekiplerinin de mutlaka kimyasalların özellikleri hakkında bilgilendirilmesi gerekmektedir.

Endüstriyel yangınlar hızlı bir şekilde büyüme kapasitesine sahip olduğundan ikincil tehlikeleri ve olumsuzlukları da beraberinde getirmektedir. Aşırı sıcaktan bina çökebilme, tanklar devrilebilme, besleyici su boruları kırılabilme, sevkiyat pompaları ve izolasyon vanaları arızalanabilmektedir. Yakıt beslemesi durdurulamazsa ve yangın büyümeye devam ederse bazen can kaybı olmaması için bütün yakıtın yanmasına izin verilmektedir. Bu durumda ciddi boyutta maddi zarar meydana gelmektedir (Khan vd., 1999).

Endüstriyel tesis yangınına iyi yönetebilmek için önceden yapılmış eğitimler ve tatbikatlar, planlanmış taktikler, acil eylem ve operasyon planlarının varlığı ve yangına müdahalede risk analizinde belirlenmiş özel yangın söndürücülerin ve teçhizatların hazır olması büyük önem taşımaktadır. Yangın sonrasında bile yeniden alevlenme göz önünde bulundurularak yangın araç, gereç ve ekipler hazır olarak bekletilmelidir. Bunların dışında yangın esnasında;

- Bilgi ve haberleşmenin hızlı bir şekilde sağlanması
- Yangının henüz ulaşmadığı bölgedekilerin uyarılması
- Zehirli gaz salınımı varsa bölge sakinlerine ve yakın sağlık kuruluşlarına haber verilmesi
- Yangın çıkışlarına anonsla yönlendirme yapılması

- İkincil patlamanın olabileceği veya yangının yönlenebileceği tehlikeli noktalara yönelimin durdurulması
- Acil sağlık hizmetinin verilmesi
- Beslenme ve geçici barınma ihtiyacının karşılanması büyük önem taşımaktadır (Fischer vd., 2013).

**Tahliye ve Kurtarma:** Yangının başlaması ile büyüme aşaması arasındaki zaman; insanların tahliyesi ve yangına müdahale edenlerin kurtarma ve söndürme operasyonları için en kritik zamandır. Acil müdahale ekibinin temel sorumluluğu, yangın durumunda daha önce hazırlanan acil durum yangın tahliye planına göre çalışanları işyerinden güvenli bir şekilde tahliye etmektir. Tahliye/kurtarma yöntemlerinin öncelik sırası aşağıdaki gibidir;

- 1- Merdivenler
- 2- Yangın Çıkışları
- 3- Hidrolik/Mekanik Kaldırma Sistemleri, Asansörler
- 4- İtfaiye Merdiveni
- 5- Portatif Merdivenler
- 6- Halat, Halat Merdivenler ve Can Kurtarma Kemerleri
- 7- Ağ/Branda Gerilmesi (Ball, 2001).

### **3. ENDÜSTRİYEL YANGIN VE PATLAMA İSTATİSTİKLERİ VE YÖNETMELİKLER**

#### **3.1. Dünya'da Endüstriyel Yangın ve Patlamalar**

Endüstriyel yangınlar ve patlamalar, dünya genelinde önemli bir güvenlik ve sağlık sorunu oluşturmaktadır. Dünya genelinde her yıl

binlerce endüstriyel yangın ve patlama olayı kaydedilmektedir. Genellikle kimya, petrol, gaz ve enerji sektörlerinde meydana gelen bu olaylar hem insan hayatını hem de çevreyi tehdit eden ciddi sonuçlar doğurmaktadır.

**Tablo 1:** EMDAT verilerine göre 1900-2024 yılları arasında kıtalar genelinde endüstriyel yangınların ve patlamaların sayısı, ölen ve etkilenen sayısı ve toplam zarar (WEB-4, 2024).

<b>Kıta</b>	<b>Endüstriyel Kaza Türü</b>	<b>Kaza Sayısı</b>	<b>Ölen Sayısı</b>	<b>Etkilenen Sayısı</b>	<b>Zarar '000 US \$</b>
<b>Afrika</b>	Yangın	15	445	573	12100
	Patlama	60	4150	8967	896400
<b>Amerika</b>	Yangın	29	652	95311	123500
	Patlama	91	6878	141706	23702200
<b>Asya</b>	Yangın	138	3713	349244	747905
	Patlama	512	18767	489310	15583874
<b>Avrupa</b>	Yangın	39	734	20234	1724500
	Patlama	124	7065	232520	227200
<b>Okyanus ya</b>	Yangın	-	-	-	-
	Patlama	4	51	2062	12000
<b>Toplam</b>	<b>Yangın</b>	<b>221</b>	<b>5544</b>	<b>465362</b>	<b>2608005</b>
	<b>Patlama</b>	<b>791</b>	<b>36911</b>	<b>874565</b>	<b>40421674</b>

Tablo 1’ de görüldüğü üzere; CRED Acil Durumlar Veri Tabanı (EM-DAT) verilerine göre 1900-2024 yılları arasında toplamda 22 endüstriyel yangın, 5544 kişinin ölümüne, 465362 kişinin olumsuz etkilenmesine neden olmuştur, 791 endüstriyel patlama meydana gelmiş ve bu patlamalar sonucunda 36911 kişi ölmüş, 874565 kişi ise

olumsuz etkilenmiştir. Yine bu verilere göre en çok endüstriyel yangın (138) ve endüstriyel patlama (512) Asya kıtasında meydana gelmiştir.

### **3.2. Türkiye'de Endüstriyel Yangın ve Patlamalar**

AB, SPIRS, EMDAT ve e-Mars veri tabanlarıyla Üye Devletlerdeki Seveso kuruluşlarına yönelik daha şeffaf veriler bulunabilirken, BEKRA kuruluşlarına yönelik veriler yeterince paylaşılmamaktadır. EM-DAT verileri incelendiğinde Türkiye'de meydana gelen endüstriyel kazalar 1978 ve 2014 arasında sınırlı sayıda gözükmemektedir ve UNEP APELL Teknolojik Afetler Listesi ile Avrupa Birliği'nin Büyük Kaza Raporlama Sisteminin (MARS) sisteminde ise Türkiye'ye ait bir endüstriyel kaza raporlanmamıştır. Bu boşluk Türkiye'deki raporlama sistemi veya endüstriyel kazalarla ilgili bilgi eksikliğinden kaynaklanıyor olabilir.

Türkiye'deki teknolojik kazaların kayıt altına alındığı Teknolojik Kazalar Bilgi Sisteminin verilerine göre 1967-2018 yılları arasında Türkiye genelinde toplam 716 tane endüstriyel yangın ve patlama meydana gelmiştir (WEB-5, 2024).

Henüz kapsamlı verilerin bulunmadığı Türkiye Afet Bilgi Bankası (TABB) sisteminin geliştirilmesiyle afetlere karşı hazırlıklı olma ve olası zararların azaltılması için tüm belge ve kaynakların bir arada bulunması, geçmiş verilerin analiz edilebilmesi, doğal ve teknolojik afetler konusunda mevcut çalışmalara sistem üzerinden daha kolay ulaşılması amaçlanmaktadır (WEB-6, 2024).

TMMOB Kimya Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi son 7 yıldır Türkiye'de meydana gelen endüstriyel kazaları düzenli bir şekilde

raporlamaktadır. Yapılan araştırmaların sonuçlarına göre 2017-2023 yılları arasında 3147 tane endüstriyel yangın ve patlama meydana gelmiş, bu kazalar sonucunda 156 kişi ölmüş, 1147 kişi yaralanmıştır.

**Tablo 2:** 2017-2023 yılları arasında Türkiye'de meydana gelen endüstriyel yangın ve patlamaların sayısı, ölen ve yaralanan sayısı (TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, 2024).

Yıllar	Endüstriyel Kaza Türü	Endüstriyel Kaza Sayısı	len Sayısı	Yaralanma
2017	Yangın ve Patlama	178	20	298
2018	Yangın ve Patlama	427	25	72
2019	Yangın ve Patlama	539	30	134
2020	Yangın ve Patlama	493	29	239
2021	Yangın ve Patlama	394	8	114
2022	Yangın ve Patlama	587	22	139
2023	Yangın ve Patlama	529	22	152
<b>Toplam</b>	<b>Yangın ve Patlama</b>	<b>3147</b>	<b>156</b>	<b>1148</b>

Bu kazaların sektörel dağılımları metal, tekstil, ağaç-kağıt-mobilya, kauçuk-plastik ve petrokimya sektörlerinde yoğunlaşmıştır. Bunların yanında nedeni bilinmeyen yangın ve patlama sayısının da oranı yüksektir. Kimya Mühendisleri Odası bunun sebebini, itfaiye müdürlüklerinden gelen, firma adı, firma büyüklüğü, kazanın oluş sebebi, firma sektörü/işkolu gibi bilgilerin mevcut olmaması ya da yetersiz olmasından kaynaklandığını belirtmiştir.

**Tablo 3:** 2017-2023 yılları arasında Türkiye'de meydana gelen endüstriyel yangın ve patlamaların sektörel dağılımı ve yüzdesi (TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, 2024).

<b>Endüstriler</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>
Tekstil	48	107	69	90	64	62	73
Plastik, kauçuk	36	50	59	51	50	63	79
Gıda	30	44	45	63	38	57	51
Metal	23	71	88	69	65	82	111
Petrokimya, yağ	12	18	19	17	20	21	23
Boya	12	5	5	9	0	6	8
Çimento, cam, seramik	5	5	21	17	14	12	21
Kozmetik, temizlik	4	7	8	7	7	5	7
Enerji	3	13	11	12	11	4	7
İlaç	2	4	-	2	1	2	0
Ağaç, kağıt, mobilya	-	58	75	111	81	96	114
Bilinmeyen	3	45	139	45	43	177	35
<b>Toplam Yangın ve Patlama Sayısı</b>	<b>178</b>	<b>427</b>	<b>539</b>	<b>493</b>	<b>394</b>	<b>587</b>	<b>529</b>

2017-2023 yılları arasında çeşitli endüstriyel sektörlerde meydana gelen yangın ve patlama sayılarının yıllara göre dağılımını gösteren Tablo 3'e göre toplam yangın ve patlama sayısında 2018 yılında belirgin bir artış gözlemlenirken, 2019'da zirve yaparak 539'a ulaşmıştır; ardından 2020 ve 2021 yıllarında bir düşüş yaşanmış, 2022'de tekrar artış göstermiştir. Sektörel bazda incelendiğinde, tekstil sektörü 2018'de 107 yangınla en yüksek sayıya ulaşmış, ardından 2023'te 73 yangına gerilemiştir. Metal sektörü ise 2023'te 111 yangınla en yüksek seviyeye ulaşarak dikkat çekmektedir. Plastik ve kauçuk

sektörü, 2017'den itibaren sürekli bir artış göstererek 2023'te 79 yangına ulaşmıştır. Gıda sektörü, 2020'de 63 yangınla en yüksek sayıya ulaşmış, sonrasında ise dalgalı bir seyir izlemiştir. Ağaç, kağıt ve mobilya sektörü, 2018'de 58 yangınla başlamış ve 2023'te 114 yangına ulaşarak önemli bir artış göstermiştir. "Bilinmeyen" kategorisi, 2019'da 139 yangınla zirve yapmış, ardından 2022'de 177 yangına ulaşarak kaynağı belirlenemeyen yangınların artışını göstermektedir. Bu veriler, endüstriyel yangın güvenliği önlemlerinin güçlendirilmesi ve sektörel bazda risk değerlendirmelerinin yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek yangın sayısına sahip sektörlerde (örneğin, tekstil, metal ve ağaç) yangın güvenliği eğitimlerinin artırılması ve önleyici tedbirlerin alınması, yangınların azaltılmasına katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi İtfaiye Daire Başkanlığı'ndan elde edilen veriler doğrultusunda, 2015-2020 yılları arasında İstanbul'da meydana gelen endüstriyel kazaların nedenleri incelendiğinde, bu kazaların %44,8'inin elektrikli ekipmanlardan, %17,9'unun sıcak iş ekipmanlarından, %14,8'inin ısıtma ekipmanlarından, %10,6'sının sigara kullanımından, %5,3'ünün alevlenir ve patlayıcı kimyasal maddelerden, %1,3'ünün yemek pişirme ekipmanlarından ve %1,1'inin kundaklama eylemlerinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. En az görülen nedenler arasında %0,0004 ile doğal olaylar ve %0,1 ile sınıflandırılmayan olaylar yer almakta olup, yangınların %4,2'sinin kaynağının belirlenemediği anlaşılmaktadır. Ayrıca, genel endüstriyel yangınların meydana geldiği binaların kullanım amacına göre dağılımı incelendiğinde, yangınların



en fazla %26,3 oranıyla atölyelerde, %23 oranıyla imalathanelerde ve %19,8 oranıyla fabrikalarda gerçekleştiği belirlenmiştir. Yangınların en az görüldüğü alanlar ise %0,0004 ile gaz tesisleri, %0,2 ile enerji üretim tesisleri ve %0,5 ile gıda işleme tesisleri olarak kaydedilmiştir. İstanbul'da endüstriyel kazaların en sık yaşandığı ilçeler ise Başakşehir, Esenyurt ve Ümraniye olarak tespit edilmiştir. Bu bulgular, endüstriyel yangın güvenliği önlemlerinin güçlendirilmesi ve risk yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi açısından önemli bir temel oluşturmaktadır (Toptay, 2021).

### **3.3. Türkiye'de Endüstriyel Kazaların Azaltılmasına Yönelik Yönetmelikler**

İtalya'nın Milano kentinin küçük bir kasabası olan Seveso'da 10 Temmuz 1976'da büyük bir endüstriyel kaza yaşanmış bilinen en zehirli gazlardan dioksan çevreye yayılarak 736 kişide yanık oluşturmuş, 36.000 kişiyi de olumsuz etkilemiştir. Kasaba da kanserle mücadele yıllar boyu devam etmiştir ve hala da kazanın insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin sürdüğü düşünülmektedir. Bu büyük kazadan sonra endüstriyel kazaların oluşmadan önlenmesi ve bunun için gerekli önlemlerin alınması adına hazırlanmış olan Seveso Direktifi (82/501/EEC) 24 Haziran 1982 yılında yayınlanmıştır (Eskenazi vd., 2018).

96/82/EC sayılı “Tehlikeli Maddeleri İçeren Büyük Kaza Risklerinin Kontrolüne İlişkin Direktif (Seveso-II Direktifi)” ise 9 Aralık 1996'da yayımlanmıştır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile Çalışma ve Sosyal Güvenlik bakanlığınca oluşturulan bir

komisyon tarafından ülkemiz mevzuatına uyumlaştırılan Seveso-II Direktifi, “Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik” adı altında 30 Aralık 2013 tarih ve 28867 Mükerrer sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir.

Mevzuatın en son hali 2 Mart 2019 tarihinde 30702 mükerrer sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak Seveso III Direktifi’ne uyumlaştırılması amaçlanmıştır. Seveso III Direktifi ve Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik’in büyük oranda birbirlerine benzer niteliklere sahiptir (İKV, 2020).

Ülkemizde Büyük endüstriyel kazalarla ilgili büyük kaza önleme politikaları ve güvenlik belgeleri ile ilgili tebliğ ve yönetmelikler yeniden eskiye doğru aşağıdaki gibidir (WEB-7, 2024);

- 15.08.2020 Büyük Endüstriyel Kazalarda Uygulanacak Dâhili Acil Durum Planları Hakkında Tebliği
- 15.08.2020 Büyük Endüstriyel Kazalarda Uygulanacak Dâhili Acil Durum Planları Hakkında Tebliği
- 30.06.2020 Büyük Endüstriyel Kazalarla İlgili Hazırlanacak Büyük Kaza Senaryo Dokümanı Tebliği
- 19.04.2019 Büyük Endüstriyel Kazalar ile ilgili Hazırlanacak Güvenlik Raporu Tebliği
- 19.04.2019 Büyük Endüstriyel Kazalar ile ilgili Büyük Kaza Önleme Politika Belgesi Tebliği
- 02.03.2019 Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik

• 18.07.2017 Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik

• 02.08.2016 Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik

• 31.03.2016 Büyük Endüstriyel Kaza Risklerinin Azaltılmasına Yönelik Dahili Acil Durum Planı Tebliği

• 24.01.2015 Büyük Endüstriyel Kazalar ile ilgili Hazırlanacak Güvenlik Raporu Tebliği

• 30.12.2013 Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik

• 31.07.2012 Büyük Endüstriyel Kazaların Kontrolü Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik

• 18.08.2010 Büyük Endüstriyel Kazaların Kontrolü Hakkında Yönetmelik

## **SONUÇ**

Endüstriyel yangınlar ve patlamalar, sanayi tesislerinde meydana gelen ve ciddi can ve mal kaybına yol açabilen olaylardır. Bu çalışmada, endüstriyel tesislerde yangın ve patlama risklerinin nedenleri, yanma çeşitleri, yangın sınıfları, söndürme prensipleri ve güvenlik önlemleri kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Endüstriyel tesislerin doğası gereği, yüksek miktarda yanıcı ve parlayıcı maddelerin kullanılması, depolanması ve işlenmesi, bu tesislerin yangın riski taşıyan alanlar haline gelmesine neden olmaktadır. Özellikle elektrikli

ekipmanlar, sıcak iş ekipmanları ve yanıcı kimyasallar gibi faktörler, yangın ve patlama olaylarının tetikleyicileri arasında yer almaktadır. Bu nedenle, endüstriyel tesislerde yangın güvenliği yönetim sistemlerinin etkin bir şekilde uygulanması, yangınların önlenmesi ve etkilerinin azaltılması açısından kritik bir öneme sahiptir.

İstatistiksel veriler, Türkiye'de ve dünya genelinde endüstriyel yangın ve patlama olaylarının sıklığını ve bu olayların sonuçlarını ortaya koymaktadır. CRED Acil Durumlar Veri Tabanı (EM-DAT) verilerine göre, 1900-2024 yılları arasında dünya genelinde 221 endüstriyel yangın ve 791 endüstriyel patlama kaydedilmiştir. Bu olaylar sonucunda 36,911 kişi hayatını kaybetmiş ve 874,565 kişi olumsuz etkilenmiştir. Türkiye'de ise 2017-2023 yılları arasında meydana gelen 3147 endüstriyel yangın ve patlama olayı, 156 can kaybı ve 1147 yaralanma ile sonuçlanmıştır. Bu veriler, endüstriyel tesislerde yangın güvenliği önlemlerinin güçlendirilmesi ve sektörel bazda risk yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Özellikle yüksek yangın sayısına sahip sektörlerde (örneğin, tekstil, metal ve ağaç) yangın güvenliği eğitimlerinin artırılması ve önleyici tedbirlerin alınması, yangınların ve patlamaların azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

Ayrıca, endüstriyel yangın ve patlama olaylarının önlenmesi için risk değerlendirmesi, acil durum planları ve çalışan eğitimlerinin gerekliliği üzerinde durulmuştur. Yangın güvenliği yönetim sisteminin temel bileşenleri arasında risk değerlendirmesi, planlama, organizasyon, kontrol, izleme ve gözden geçirme süreçleri yer almaktadır. Bu süreçlerin etkin bir şekilde uygulanması, yangın ve

patlama risklerinin minimize edilmesine yardımcı olmaktadır. Türkiye'de, Seveso Direktifi ve ilgili yönetmelikler, büyük endüstriyel kazaların önlenmesi ve etkilerinin azaltılması için gerekli yasal çerçeveyi sağlamaktadır. Bu bağlamda, endüstriyel tesislerde yangın güvenliği kültürünün oluşturulması hem çalışanların hem de çevrenin korunması açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Sonuç olarak, endüstriyel yangın ve patlama risklerinin azaltılması için kapsamlı güvenlik önlemleri alınması, sürekli eğitim ve denetim süreçlerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır. Yangın güvenliği, sadece teknik bir mesele değil, aynı zamanda bir kültür meselesidir. Tesislerde yangın güvenliği kültürünün oluşturulması, çalışanların bilinçlendirilmesi ve acil durum senaryolarına hazırlıklı olmaları, yangınların önlenmesi ve etkilerinin azaltılması açısından hayati öneme sahiptir. Bu nedenle, endüstriyel tesislerin yönetimlerinin, yangın güvenliği konusunu öncelikli bir mesele olarak ele alması ve gerekli kaynakları bu alana yönlendirmesi gerekmektedir.

## **KAYNAKLAR**

- A. Sengupta, D. B. (2016). An evaluation of risk assessment framework for industrial accidents in India. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 41, 295-302.
- ABS. (2017). *Guidance Notes on Fire-Fighting Systems*. American Bureau of Shipping.
- AIChE. (2008). *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures (3b)*. Wiley-AIChE.
- Akano, O. A., Hanson, E., Nwakile, C., & Esir, A. E. (2024). Improving worker safety in confined space entry and hot work operations: Best practices for high-risk industries. *Global Journal of Advanced Research and Reviews*, 02(02), 031-039.
- Ball, J. L. (2001). *Employee Fire And Life Safety: Developing a Preparedness Plan and Conducting*. National Fire Protection Association.
- Bourassa, D. G.-N. (2016). Equipment failures and their contribution to industrial incidents and accidents in the manufacturing industry. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 22(1), 131-141.
- Carino, N. . (2005). *Passive Fire Protection*. Gaithersburg: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster (NIST NCSTAR 1-6A), National Construction Safety

Team Act Reports (NIST NCSTAR), National Institute of Standards and Technology.

Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2011). *Chemical Process Safety Fundamentals with Applications*. Pearson Education, Inc.

ÇSB-BEKRA. (2013). *Büyük Endüstriyel Kaza Risklerinin Azaltılması (Bekra) İşletmeciler İçin Rehber*. Çevre,Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.

Davletshina, T. (1998). *Industrial Fire Safety Guidebook*. New Jersey: Noyes Publications.

Davletshina, T. A., & Cheremisinoff, N. P. (1998). Chemistry of Fire and Toxic Materials. *Fire and Explosion Hazards Handbook of Industrial Chemicals* , 153–264.

Duma, S. D., Makhanya, B., & Nel, H. (2021). A Systematic Literature Review on Industrial Fire and Explosion Accidents in the Petrochemical Industry. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 1526-1530.

Eckhoff, R. K. (2003). Dust Explosions—Origin, Propagation, Prevention, and Mitigation: An Overview. R. K. Eckhoff (Dü.) içinde, *Dust Explosions in the Process Industries (Third Edition)* (s. 1-156). Gulf Professional Publishing.

- Er, H., & Hoşten, G. (. (2024). Kimya Sektöründe Hazop Ve Eta Risk Değerlendirmesi Yöntemleri İle Çalışanların Sağlık Riskinin Kontrolü. *Aydın Sağlık Dergisi*, 10(3), 245-267.
- Eskenazi, B. W. (2018). The Seveso accident: A look at 40 years of health research and beyond. *Environment International*, 121, 71-84.
- Evans, D. ., (2005). *Active Fire Protection Systems*. . Gaithersburg: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster (NIST NCSTAR 1-4), National Construction Safety Team Act Reports (NIST NCSTAR), National Institute of Standards and Technology.
- FEMA. (2018). *Risk Management Practices in the Fire Service*.
- Fischer, R. J., Halibozek, E. P., & Walters, D. C. (2013). Contingency Planning, Fire Protection, Emergency Response and Safety. *Introduction to Security (Ninth Edition)*, 241-282.
- Friedman, R. (1998). *Principles of Fire Protection Chemistry and Physics*. Jones & Bartlett Learning.
- Furness, A., & Muckett, M. (2007). *Introduction to Fire Safety Management*. Butterworth-Heinemann-Elsevier.
- Griffiths, S. D. (2018). A study of particulate emissions during 23 major industrial fires: Implications for human health. *Environment International*, 112, 310- 323.



- Hassanain, M. A., Al-Harogi, M., & Ibrahim, A. M. (2022). Fire Safety Risk Assessment of Workplace Facilities: A Case Study. *Frontiers in Built Environment*, 8, 2297-3362.
- HSE. (2022). *Fire safety in construction*. TSO (The Stationery Office).
- İKV. (2020). *Sanayi-Çevre İlişkisi: AB ve Türkiye'de Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi Yönergisi*. İktisadi ve Kalkınma Vakfı.
- İnce, A. (2019). Yangına Karşı alınacak Güvenlik Tedbirleri. [https://www.abdurrahmanince.net/Yangin\\_Tedbirleri.pdf](https://www.abdurrahmanince.net/Yangin_Tedbirleri.pdf) adresinden alındı
- Jönsson Johan, R., & Lundin, L. (2000). Fire Safety Design based on Risk Assessment. *Fire Science and Technology*, 20(1), 13-25. doi:DOI: 10.3210/fst.20.13
- Khan, F. I., & Abbasi, S. (1999). . Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 12(5), 361-378.
- Kondashov, A., Bobrinev, E., & Udavtsova, E. (2024). Structure of causes of fires at industrial facilities. *Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia(1)*, 13-22.
- Lemkowitz, S., & Paskan, J. (2014). Lemkowitz S.M. and Paskan H. J., 2014, A Review of the Fire and Explosion Hazards of Particules. *KONA Powder and Particle Journal*, 31, 53-81.

- New Zeland Fire Services. (2009). *Qualified Firefighter Programme – Fire Science and Ventilation Study guides*. New Zeland Fire Services.
- NFPA. (2018). Industrial and Manufacturing Properties. National Fire Protection Association;. (C. R., Dü.) *National Fire Protection Association*.
- PU Europe Fire Safety Handbook. (2020). *European Fire Standards And National Legislation*. PU Europe Fire Safety Handbook. <https://www.pu-europe.eu/pu-europe-reports/> adresinden alındı
- PVA Safety & Security Committee . (2005). *Basic Fire Fighting*. PVA Safety & Security Committee .
- Santos-Reyes, J., & Alan N Beard. (2001). A systemic approach to fire safety management. *Fire Safety Journal*, 36(4), 359-390.
- Schroll, R. C. (2002). *Industrial Fire Production Handbook* (2nd b.). CRC Press LLC.
- Seçer, İ., & Satyen, L. (2006). Fire safety training: Its importance in enhancing fire safety knowledge and response to fire. *Australian Journal of Emergency Management*, 21(4), 48-53.
- TMMOB Kimya Mühendisleri Odası. (2024). *Endüstriyel Yangınlar ve Patlamalar 2023 Raporu*. TMMOB Kimya Mühendisleri Odası.
- Toptay, G. (2021). 2015-2020 Yılları Arasında İstanbul'da Çıkan Endüstriyel Yangınların Çıkış Sebeplerini Geriye Dönük Olarak İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*.

Underhill, R. (2019). *The chemistry of fire and fire suppression*. .  
*Defence Research and Development Canada (Department of  
National Defence)*.

WEB-1. (2007). *Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetme-  
lik*. 2024 tarihinde  
[https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/12/20071219-  
2.htm](https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/12/20071219-2.htm) adresinden alındı

WEB-2. (2024). *Türk Standardı*.  
[https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/Standard.aspx?08111  
805111510805110411911010405504710510212008811104311  
3104073085112121052084054050119105097080](https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073085112121052084054050119105097080) adresinden  
alındı

WEB-3. (2024). *National Fire Protection Association (NFPA)*.  
[https://www.nfpa.org/for-professionals/codes-and-standards/list-  
of-codes-and-  
standards#aq=%40culture%3D%22en%22&cq=%40tagtype%3  
D%3D\(%22Standards%20Development%20Process%22\)%20%  
20&numberOfResults=12&sortCriteria=%40computedproductid  
%20ascending%2C%40produc](https://www.nfpa.org/for-professionals/codes-and-standards/list-of-codes-and-standards#aq=%40culture%3D%22en%22&cq=%40tagtype%3D%3D(%22Standards%20Development%20Process%22)%20%20&numberOfResults=12&sortCriteria=%40computedproductid%20ascending%2C%40produc) adresinden alındı

WEB-4. (2024). *EM-DAT*. <https://public.emdat.be/data> adresinden  
alındı

WEB-5. (2024). *Teknolojik Kazalar Bilgi Sistemi*.  
<https://teknolojikkazalar.org/list/accident> adresinden alındı

WEB-6. (2024). *Türkiye Afet Bilgi Bankası*. 2024 tarihinde <https://www.afad.gov.tr/tabb-turkiye-afet-bilgi-bankasi> adresinden alındı

WEB-7. (2024). *Büyük endüstriyel kazalarla ilgili büyük kaza önleme politikaları ve güvenlik belgeleri ile ilgili tebliğ ve yönetmelikler*. 2024 tarihinde <https://www.mevzuat.gov.tr> adresinden alındı

Xu, X. Z. (2024). Enhancing Fire Resilience in High-Tech Electronic Plants for Sustainable Development: Combining System Composition with Organizational Management. *Sustainability*, 16(4), 1501.

Yılmaz, K. (Dü.). (2023). *Endüstriyel yangınların Önlenmesinde ve Müdahalesinde Yenilikçi ve Etkili Yaklaşımlar*. Serüven Yayınevi.

Zakel, S., Brandes, E., & Schröder, V. (2019). Reliable safety characteristics of flammable gases and liquids – The database Chemsafe. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 62(103914).

Zarranejad A., A. O. (2015). Fire and explosion risk assessment in a chemical company by the application of DOW fire and explosion index. *Journal of Occupational Health and Epidemiology*, 4(3), 168-175.



## BÖLÜM 3

# GGG40 VE GGG70 DÖKME DEMİR MALZEMELERİN BORLAMA İLE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

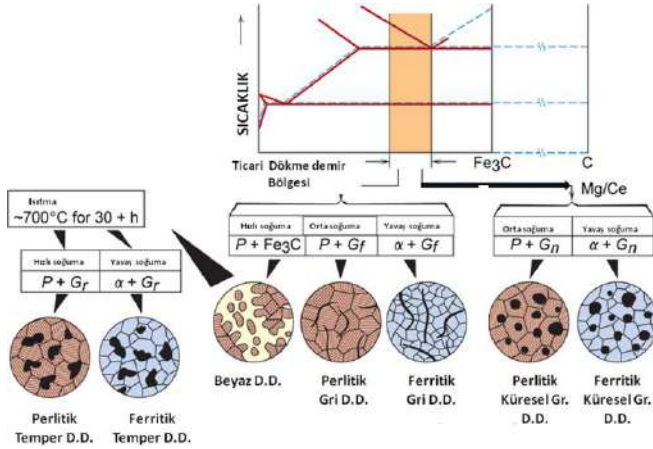
Öğr. Gör. Ece SİMOOĞLU SARI  
Dr. Öğr. Üyesi Funda Gül KOÇ  
Nida KÖSE  
Prof. Dr. Muzaffer ZEREN

## GİRİŞ

Küresel grafitli dökme demirler yüksek mukavemet ve tokluk özelliklerinin yanısıra, düşük maliyetli ve kolay üretilebilir özellikte olması nedeniyle endüstride önemli kullanım alanına sahip malzemelerdir. Küresel grafitli dökme demirlerde karbonun ayrışma miktarına bağlı olarak ferritik, ferritik-perlitik veya perlitik demir (Fe) matrisi içinde dağılmış küresel yapıda grafitler içeren bir yapı söz konusudur. Grafitlerin küresel yapıda olması mekanik özellikler açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Bu malzemeler bileşimlerinde ağırlıkça yüksek miktarda C ve Si içermektedirler. Bu malzemelerin üretiminde son derece yüksek akıcılık ve dökülebilirlik özelliklerinin yanısıra titreşim gibi özellikleri, çeliklere ve diğer dökme demir türlerine kıyasla daha yüksektir (*Laleci Y., ve diğ.,2022*).

Sfero malzemelerin özellikleri üzerinde matriste ferrit ve perlit fazlarının miktarları önemli etkiye sahiptir. Döküm malzemelerde mikroyapıyı kontrol eden başlıca faktörler; karbon içeriği, alaşım elementi miktarı, katılaşma sırasında ve katılaşma sonrası soğuma hızı,

dökümden sonra uygulanan ısı işlemlerdir. Dökme demirler temelde 5 sınıfta toplanabilirler (Şekil 1). Dökme demirlerin mikroyapıları ve mekanik özelliklerindeki farklılık bu malzemelerin endüstride geniş bir kullanım alanı sunmaktadır (Rilwan O., 2015, Callister W., 2015).

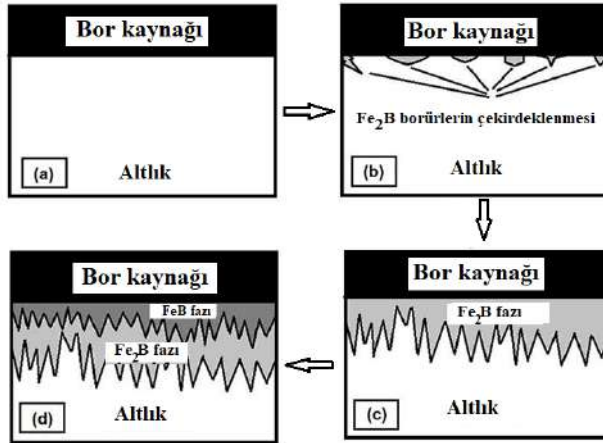


**Şekil 1.** Dökme demirlerin sınıflandırılması (Rilwan O., 2015, Callister W., 2015).

Küresel grafitli dökme demirler, ergitilmiş dökme demirin pota veya kalıp içerisinde Mg veya Ce elementleri ile aşılması ile elde edilmektedir (Özusta, B., 2021, Zanardi F., ve diğ., 2020).

Dökme demir malzemelerin yüksek aşınma dayanımı gerektiren uygulama alanlarında kullanımı arttırmak amacıyla borlama, nitrasyon gibi çeşitli yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Borlama, bor atomlarının bir yüzeyden yayıldığı termokimyasal bir yüzey işlemidir. Bu işlem ile bor açısından zengin bir ortamda ısı işlem uygulanan malzeme yüzeyinde intermetalik bileşikler (borürler) oluşturulur. Ortaya çıkan yüzey katmanı son derece serttir ve oda sıcaklığındaki ve yüksek

sıcaklıklardaki aşınma direncini artırır. Ayrıca borür katmanları, yapışma kaynaklı aşınma, oksitleyici olmayan seyreltik asitlerde ve alkalilerde korozyon-erozyon direncini artırır. Bütün bu özellikler, borlama işlemi yapılırsa makine parçalarının servis ömrünün birkaç kez uzatılabileceği anlamına gelir. Kutu borlama genellikle yüzeyi iyi temizlenmiş çeliğin bir borlama karışımı ile temas edecek şekilde tercihen, 800-1000°C aralığında 1 ila 12 saat süreyle tutulması ile gerçekleştirilir. Sade karbonlu çeliklerin kutu borlama işlemi sırasında bor atomları çeliğin yüzeyine yayılır. Çelik yüzeyde FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazları oluşur. Fe<sub>2</sub>B fazı çeliğin iç kısmına yakın oluşurken, FeB fazı ise çelik yüzeyinde oluşur. Bu iki faz bir arada mevcut olduğunda, termal genleşme katsayıları farkından dolayı yanal çatlakların ortaya çıkması mümkündür. Sade karbonlu çeliklerde tarak-testere benzeri borür tabakaları oluşur (Milinovi'c A., ve diğ., 2022). Şekil 2'de borür tabakalarının oluşumunun şematik gösterimi verilmiştir.



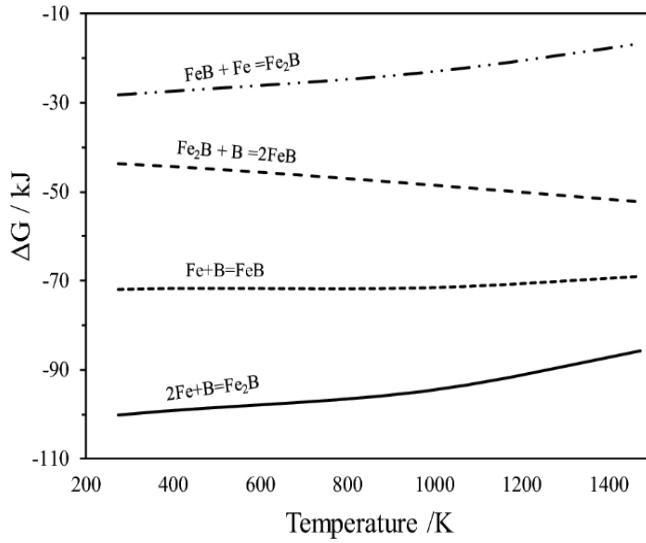


**Şekil 2.** Borür tabakalarının oluşum aşamalarının şematik gösterimi;(a) prosesin başlangıç durumu, (b) demir borürlerin çekirdeklenmesinin başladığı ikinci aşama, (c) Fe<sub>2</sub>B fazının teşvik edildiği üçüncü aşama, (d) FeB fazının oluştuğu son aşama (Velázquez J, ve diğ.2019).

Fe<sub>x</sub>B sentezi sırasında oluşması muhtemel reaksiyonlar aşağıdaki gibidir (Kartal L., 2023);

- $2\text{Fe} + \text{B} = \text{Fe}_2\text{B}$
- $\text{Fe} + \text{B} = \text{FeB}$
- $\text{Fe}_2\text{B} + \text{B} = 2\text{FeB}$
- $\text{FeB} + \text{Fe} = \text{Fe}_2\text{B}$

Fe ve B varlığında oluşması muhtemel Fe<sub>x</sub>B bileşiklerinin Gibbs serbest oluşum enerjileri Şekil 3'de verilmiştir.



**Şekil 3.** Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak reaksiyonların Gibbs serbest enerjisindeki değişimi (Rosocka R. ve diğ., 2007,. Gueccia R, ve diğ.,2021, Ozdemir I, ve diğ. 2014).

## MATERYAL VE METOT

Borlama işlemleri uygulanan malzemeler, kimyasal kompozisyonu EN-GJS-400-15 (GGG 40) ve EN-GJS-500-7 (GGG 70) standartlarına uygun küresel grafitli dökme demir malzemelerdir. Küresel grafitli dökme demir malzemelerin genel kompozisyonu (EN GJS Cast Iron) ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir. GGG 40 malzeme %100 ferrit mikroyapıda olup, %93 küreselliğe sahiptir. GGG 70 malzeme ise %100 perlitik yapıda olup, %92 küreselliğe sahiptir.

**Tablo 1.** Küresel grafitli dökme demir malzemelerin genel kompozisyonu (*EN GJS Cast Iron*) (ağ.%)

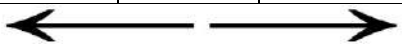
<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Fe</b>
3.4-3.85	2.3-3.1	0.1-0.3	0.10	0.02	Kalan

**Tablo 2.** Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri (*Dijkkamp.nl*)

<b>Mekanik Özellik</b>	<b>EN-GJS-400-15 (GGG40)</b>	<b>EN-GJS-700-2 (GGG70)</b>
<b>R<sub>m</sub></b> – Çekme mukavemeti (MPa)	<b>400</b>	<b>700</b>
<b>R<sub>p0.2</sub></b> - 0.2% mukavemeti (MPa)	<b>250</b>	<b>420</b>
<b>A</b> – Min uzama (%)	<b>15</b>	<b>2</b>
Brinell sertlik (HV)	<b>135 - 180</b>	<b>210 - 305</b>

Dökme demirlerin mekanik özelliklerin karşılanabilmesi malzemenin genellikle ağırlıklı olarak perlitik bir mikroyapıya sahip olmasıyla ilgilidir. GGG40 malzemedan GGG80 malzemeye doğru mikroyapıda ferritik yapıdan perlitik yapıya geçiş artmaktadır (Tablo 3). EN-GJS-700-2 (GGG70), GGG50 ve GGG60'a göre daha yüksek mekanik özelliklere sahip perlitik bir yapıya sahiptir ve bu da daha iyi aşınma direnci sağlar.

**Tablo 3.** Küresel grafitli dökme demir çeşitleri ve mikroyapıları (Dijkkamp.nl)

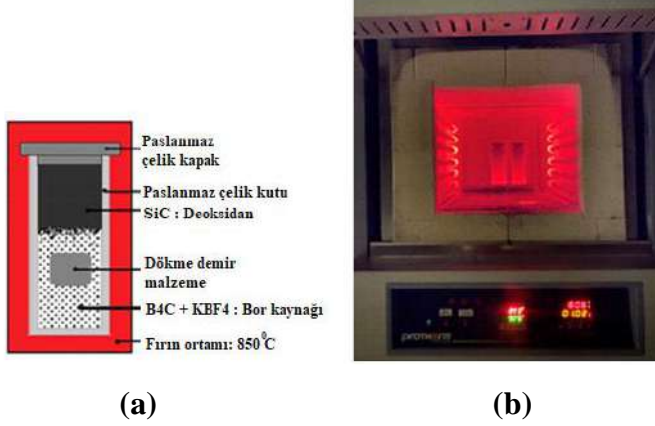
<b>Malzeme Cinsi</b>	<b>GGG40</b>	<b>GGG50</b>	<b>GGG60</b>	<b>GGG70</b>	<b>GGG80</b>
Mikroyapı	Ferritik				Perlitik

Çalışma kapsamında küresel grafitli dökme demir malzemelerde borlama işleminin yüzey sertliği ve mikroyapısına etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan küresel grafitli dökme demir malzemelere, 850°C sıcaklıkta 8 saat süreyle borlama işlemi uygulanmıştır. Borlama toz karışımları Tablo 4’de verilmiştir.

**Tablo 4.** Borlama için belirlenen toz karışım oranları

<b>Karışımlar</b>	<b>% (ağırlıkça)</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

Çalışmada kullanılan borlama işleminin yapıldığı kutu borlama deney düzeneğinin ve ısıtıl işlem fırınında borlama işleminin görüntüsü Şekil 4’de verilmiştir.

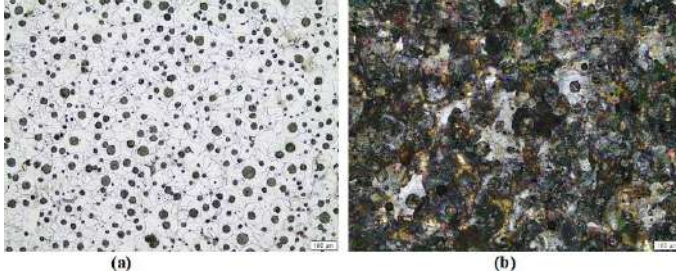


**Şekil 4.** Borlama işleminin yapıldığı (a) deney düzeneği, (b) ısıtıl işlem fırınında kutu borlama işleminin görüntüsü

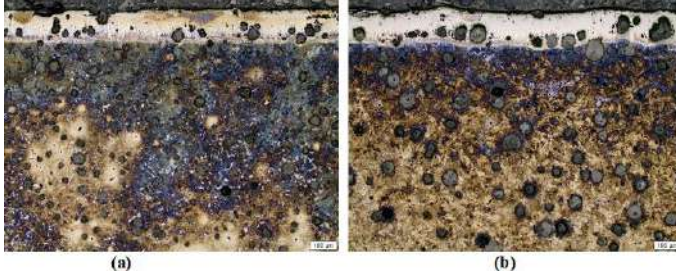
Dökme demir numunelerin borlama işlemine uygun olacak şekilde yüzeylerinin hazırlanabilmesi için; sırasıyla hassas kesme işlemi, 60, 120, 320, 600, 1000 mesh boyutlarında SiC içeriğine sahip zımpara kağıtları kullanılarak zımparalama işlemleri yapılmıştır. Bu şekilde numune yüzeyleri borlama işlemi için hazır hale getirilmiştir. Ardından numunelere Tablo 4’de verilen borlama toz karışımı ve Şekil 4’de verilen kutu borlama düzeneği kullanılarak borlama işlemi uygulanmıştır. Borlama işlemi sonrası numunelerden kesit alınarak metalografi işlemi (zımpara-parlatma) uygulanmıştır. Metalografik olarak hazırlanan borlanmış numuneler mikroyapısal incelemeler için %3’lük nital çözeltisi ile dağlanarak mikroskopta inceleme için hazır hale getirilmiştir. Mikroyapısal karakterizasyon çalışmalarında Olympus marka ışık mikroskobu kullanılmıştır. Borlama işleminin

malzemelerin yüzey sertliklerine etkisini incelemek amacıyla Microbul-1000D marka mikrosertlik cihazı ile numunelerde yüzeyden merkeze doğru sertlik profilleri elde edilmiştir.

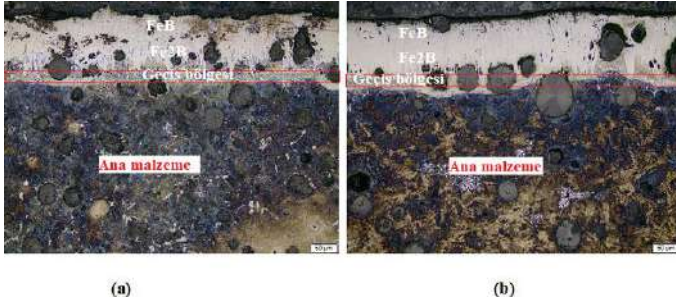
Şekil 5’de çalışma kapsamında kullanılan dökme demir malzemelerin dağlanmış konum ışık mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.a’da EN-GJS-400-15 (GGG 40) malzemenin %100 ferrit mikroyapıda olup %93 küreselliğe olduğu, Şekil 5.b’de ise EN-GJS-500-7 (GGG 70) malzemenin %100 perlitik yapıda olup, %92 küreselliğe sahip olduğu görülmektedir. Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8’de ise çalışma kapsamında kullanılan GGG40 ve GGG70 dökme demir malzemelerin borlama işlemi sonrası farklı büyütmelerde dağlanmış konum ışık mikroskop görüntüleri verilmiştir. Her iki malzemede de borlama işlemi sonrası istenilen borlama tabakasının elde edildiği görülmüştür. Yüzeyden ana yapıya doğru ikisi borür tabakası olmak üzere geçiş bölgesiyle birlikte, birbirinden görsel olarak ayırt edilebilen, üç farklı bölgenin meydana geldiği belirlenmiştir.



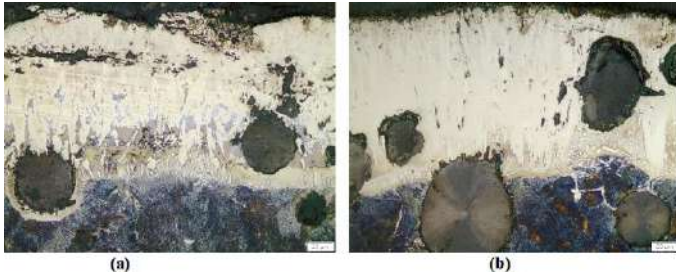
**Şekil 5.** Çalışma kapsamında kullanılan dökme demir malzemelerin dağlanmış konum ışık mikroskop görüntüleri a) GGG40, b) GGG70



**Şekil 6.** Çalışma kapsamında kullanılan dökme demir malzemelerin borlama işlemi sonrası dağlanmış konum ışık mikroskop görüntüleri a) GGG40, b) GGG70

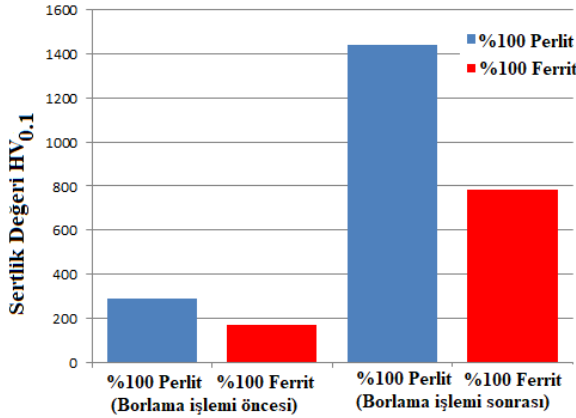


**Şekil 7.** Çalışma kapsamında kullanılan dökme demir malzemelerin borlama işlemi sonrası dağlanmış konum ışık mikroskop görüntüleri a) GGG40, b) GGG70

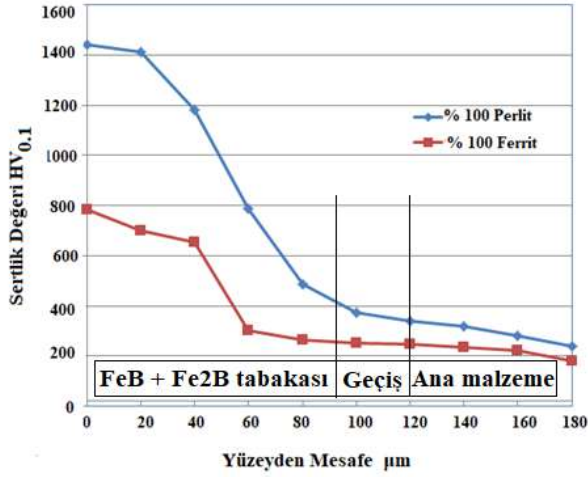


**Şekil 8.** Çalışma kapsamında kullanılan dökme demir malzemelerin borlama işlemi sonrası dağlanmış konum ışık mikroskop görüntüleri a) GGG40, b) GGG70

Borlama işleminin sonucunda küresel grafitli ferritik ve perlitik matrise sahip iki malzemenin yüzey sertliğindeki değişimi ortaya çıkarmak amacıyla 100 gr yük altında yüzeyden merkeze doğru mikrosertlik ölçümü yapılmıştır. Borlama işlemi ile malzemelerin yüzey sertliklerindeki ve yüzeyden merkeze doğru sertlik profillerindeki değişim sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Borlama işlemi ile her iki malzemenin yüzey sertliğinde önemli derecede artış meydana geldiği ve altlık malzemenin borlama işlemi sonrası sertlik değişiminde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. %100 perlitik matrise sahip GGG70 malzemedeki borlama işlemi sonrası %100 ferritik matrise sahip GGG40 malzemeye göre daha yüksek yüzey sertliği ve daha yüksek sertlikte bir borlama tabası elde edilmiştir.



**Şekil 9.** Borlama işlemi ile malzemelerin yüzey sertliklerindeki değişim



**Şekil 10.** GGG 40 ve GGG70 dökme demir malzemelerde borlanmış konumda yüzeyden merkeze sertlik profili değişimleri

## SONUÇLAR

Bu çalışmada yapılan borlama işlemi sonrasında;

- Küresel grafitli dökme demir malzemelerde borlama işlemi sonrası oluşan borür katmanlarının, testere dişi morfolojisine sahip olduğu ve dökme demirlerin yüzeyinde literatüre uygun olarak FeB fazının yanı sıra Fe<sub>2</sub>B fazının da oluştuğu gözlemlenmiştir.
- Borlama işlemi sonrasında yeterli kalınlıkta borür tabakalarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Çalışmada uygulanan borlama işlem parametrelerin (850 °C ve 8 saat süre) bor atomlarının dökme demir malzemelerde yayınması için yeterli olduğu değerlendirilmiştir.
- Borür tabakaları arasında ve geçiş bölgesinde termal gerilmelere bağlı herhangi bir çatlak, gözenek, tabakalar arası



açılmalar vb. problemlerin meydana gelmediği gözlemlenmiştir.

- Borlama işlemi sonrasında %100 perlitik malzemenin yüzey sertliği yaklaşık 1440 HV'dir. Sertlik değerinde sağlanan önemli artışın, söz konusu dökme demirlerin sürtünmeli yüzeylerde kullanılmak üzere aşınma direncinin de yüksek olmasını sağlayabileceği değerlendirilmiştir.
- İki farklı matris mikroyapısına sahip malzemelerde borlama sonrası yüzey sertliklerinde belirgin farklılık elde edilmesi borlama işleminde altlık malzemenin borlama işleminde önemli etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

## **TEŞEKKÜR**

Yazarlar çalışma kapsamında kullanılan küresel grafitli dökme demir malzemelerin temin edilmesini sağlayan Döktaş Orhangazi Demir Döküm Tesisleri, Mühendislik ve Ar-Ge Direktörü Sn. Bülent ŞİRİN'e teşekkür ederler.

## **KAYNAKLAR**

- Laleci Y., Kuruođlu U., Göl F., (2022). Kúresel grafitli dökme demirin darbe dayanımı üzerinde borlama işleminin etkisi, Boron, Özel Sayı, 32 – 39.
- Rilwan O., (2015).High Strength Solution-Strengthened Ferritic Ductile Cast Iron, Master Thesis, Aalto University School of Engineering, Espoo, Finland.
- Callister W., (2015).Ferros Fundidos; Tipos e Propriedades, Ferros fundidos Ligados Materiais de Engenharia (SEM 5908) - Rollo JMDA, Fortulan Ca ,1-46
- Özusta, B. (2021). Katı Çözeltiyle Güçlendirilmiş Ferritik Kúresel Dökme Demirlerde Aşınma Direncinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük, Türkiye.
- Zanardi F., Mapelli C., Barella S., (2020).Reclassification of Spheroidal Graphite Ductile Cast Irons Grades According to Design Needs, International Journal of Metalcasting/Volume 14, Issue 3, 622-655.
- Milinovi'c A., Maruši'c V., Konjati P., (2022). Effect of Carbon Content and Boronizing Parameters on Growth Kinetics of Boride Layers Obtained on Carbon Steels, Materials 15, 1858-1875.
- Velázquez J., Sánchez E., Itzel P., Méndez G., (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.

- Kartal L., (2023).Single Phase Iron Boride ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) Particle Production from Pickling Wastes by One Step Carbothermic Reduction, *Journal of Sustainable Metallurgy*, 9(9), 1660–1669.
- Regel-Rosocka M, Cieszynska A, Wisniewski M (2007).Methods of regeneration of spent pickling solutions from steel treatment plants. *Polish J Chem Technol* 9:42–45.
- Gueccia R, Winter D, Randazzo S et al (2021).An integrated approach for the HCl and metals recovery from waste pickling solutions: pilot plant and design operations. *Chem Eng Res Des* 168:383–396.
- Ozdemir I, Ogawa K, Sato K (2014).Iron boron based powders sprayed by high velocity spray processes. *Surf Coatings Technol* 240:373–379.
- <https://www.dijkkamp.nl/en/materials/ggg40-en-gjs-400-15/>(Ziyaret tarihi 25.12.2024)
- <https://www.dijkkamp.nl/en/materials/ggg70-en-gjs-700-2/>(Ziyaret tarihi 28.12.2024).



## BÖLÜM 4

### Mn KATKILI ZnO ARAYÜZEY TABAKALI Al/p-Si DİYOTLARDA KATKI ORANININ ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Prof. Dr. İlke TAŞÇIOĞLU

#### 1. GİRİŞ

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS), metal/oksit/yarıiletken (MOS), metal/polimer/yarıiletken (MPS) Schottky ve p-n tipi diyotlar, sensörler, ışık yayan diyotlar, güneş hücreleri, mikrodalga diyotlar gibi çok sayıda yarıiletken elektronik aygıtın temel bileşenleridir (Reddy v.d. (2022); Shao v.d. (2022)). Son yıllarda saydam iletken oksitler (TCO'lar), fotodiyotlar ve optoelektronik uygulamalar için en önemli malzemelerden biri olarak dikkat çekmiştir. TCO'lar, şeffaflık ve elektriksel iletkenlik özelliklerini birleştiren benzersiz malzemelerdir. Çinko oksit (ZnO), geniş enerji bant aralığı ( $\approx 3,3$  eV) ve bağlanma enerjisi ( $\approx 60$  meV) ile oda sıcaklığında yüksek verimli emisyon sağlama yeteneğine sahiptir. TCO sınıfında yer alan ZnO, indiyum kalay oksit (ITO) filmlerine alternatif olarak görülmektedir. Doğrudan geniş bant aralığının yanı sıra, ZnO toksik olmama, düşük maliyet, bol hammadde ve sıcaklık döngüsüne dayanıklılık gibi avantajlar sunar (Yang v.d. (2009); Jagadish v.d. (2011); Taşcıoğlu v.d. (2014)).

ZnO'nun büyütülmesi sırasında, ZnO'nun stokiometrik yapısındaki sapmalar nedeniyle çok sayıda donör tipi merkez oluşur. Bu durum, ZnO filmlerinin yüksek dirence sahip olmasının önlenmesi için bu kusurların minimize edilmesini gerektirir. ZnO'nun özellikle yüksek sıcaklıklarda dengesizliği nedeniyle, ZnO filmler oluşturulurken genellikle çeşitli katkı malzemeleri tercih edilmektedir. Katkısız ZnO ince filmler, yapılarındaki oksijen boşlukları, çinko arayer atomları ve istenmeyen hidrojen safsızlıkları nedeniyle kendiliğinden n tipi iletkenlik gösterir. Bununla birlikte, bu filmlerin yüksek öz direnci, çeşitli katkılama teknikleriyle önemli ölçüde düşürülerek iletkenlik özellikleri geliştirilebilmektedir. ZnO'nun geçiş metalleriyle katılanması üzerine yapılan çalışmalar, bu malzemenin optik, manyetik ve elektriksel özelliklerinde çarpıcı değişiklikler sağladığını ortaya koymuştur. Geçiş metali katkısı, ZnO'da yeni enerji seviyelerinin oluşmasına neden olarak malzemenin bant yapısında ve taşıyıcı yoğunluğunda önemli etkiler yaratabilmektedir. Han ve meslektaşları Al ve Mn katkısının, ZnO varistörlerin elektriksel iletkenliğine katkısını araştırmışlardır. Mn, ZnO'da derin bir verici seviyesine sahip olduğu için (oda sıcaklığında iletkenlik band kenarı altında 0.45, 0.7 veya 2 eV enerji seviyesinde) ZnO'nun iletkenliğini azalttığı, Al katkısının ise sığ bir verici seviyesi oluşturmasından dolayı ZnO'un iletkenliğini artırdığı gözlenmiştir (Han v.d. 2001). Diğer taraftan, T. Oshio ve meslektaşları, Mn katkısının ZnO epitaksiyel filmlerin elektrik ve dielektrik özelliklerine etkisini incelemiştir. Çalışmalarında Mn katkılı filmlerin, katkısız filmlere göre sızıntı akımını önemli ölçüde azalttığını rapor etmişlerdir (Oshio v.d. 2008).

Yüksek performans metal-saydam iletken oksit-yarıiletken aygıtlar için önemli olan iki unsur kristal kalitesi ve buna bağlı M/S arayüzeyinde yüksek bariyer yüksekliğidir. Ayrıca metal ve yarıiletken arayüzeyindeki tabakanın, cihazın verimliliği, uzun vadeli stabilitesi ve güvenilirliği üzerinde belirleyici bir rol oynadığı iyi bilinmektedir. Kristal yapıdaki bozukluklar ve yabancı atom kaynaklı kusurlar, arayüz bölgesinde yarıiletkenin elektronik bant yapısını değiştirebilir ve taşıyıcı hareketliliğini etkileyebilir. Bu tür tuzak yükleri valans ve iletkenlik bandındaki serbest yük taşıyıcılarının yeniden birleşmesine sebep olurlar. Bu yüzden, kullanılacak oksit tabakasının yüzeyi pasivize etmesi ve sızıntı akımını azaltması beklenmekte olup, bu sayede diyotta kontrollü akım iletim mekanizmalarının gerçekleşmesi öngörülmektedir.

ZnO filmleri çeşitli yöntemlerle üretilebilmektedir; bunlar arasında sol-jel (Foo v.d. 2013; Yakuphanoglu v.d. 2012) darbeli lazer biriktirme (Oshio v.d. 2008), ultrasonik sprej piroliz (Atay vd. 2019), moleküler demet epitaksisi (Lin v.d. 2005), metal organik kimyasal buhar biriktirme (Liang v.d. 2001) ve elektrokimyasal biriktirme (Cao v.d. 2006) gibi yöntemler yer almaktadır.

Sol-jel yöntemi, ZnO filmleri için geleneksel yöntemlere iyi bir alternatif olarak öne çıkar. Bu yöntem, kimyasal bileşenlerin kolay kontrolü, homojenlik ve ekonomik üretim avantajları sunar.

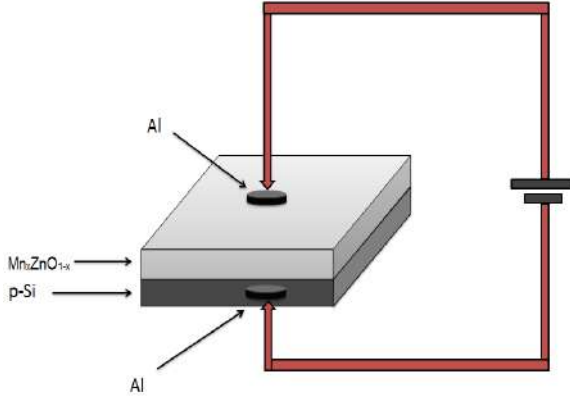
## **MALZEME VE YÖNTEM:**

Bu çalışmada MnZnO solüsyonları MnO:ZnO: 0.5:4.5,1:4 oranlarında hazırlanmıştır. Hazırlanan jel solüsyonlar kimyasal olarak temizlenmiş (111) yöneliminde, 600 µm kalınlığında 5-10 Ω.cm öz dirençli p tipi tek kristal Si alt tabakanın ön yüzeyine kaplanmıştır. Kimyasal olarak iyice temizlenen Si kristalin arka mat yüzeyine, 100 nm kalınlığında %99.999 saflıkta Alüminyum (Al)  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  Torr basınç altında metal buharlaştırma sisteminde buharlaştırılıp, yaklaşık 570 °C' de 5 dakika tavlansak omik kontak oluşturulmuştur.

MnZnO filmlerin hazırlanması için taban sol-jel spin kaplama ile taban 1500 rpm hız altında 30 s döndürülmüştür. Her bir kaplamadan sonra tabanda kalan solventi buharlaştırmak için düşük sıcaklıkta (150 °C) 10 dakika kurutulmuştur. Kaplama süreci 4 defa tekrarlanarak elde edilen filmlerde kalan organikleri buharlaştırmak için filmler yüksek sıcaklıkta 500 °C'de 1 saat boyunca ısıtılmıştır.

Son olarak  $Mn_xZnO_{1-x}$  filmlerin kaplanmasından sonra 100 nm kalınlığında kontak alanı  $3.14 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$  olan Al metal kontaklar elde edilen filmlerin üzerine buharlaştırılmıştır. Akım-voltaj ölçümlerini almak için Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı kullanılmıştır. Hazırlanan Al/ $Mn_xZnO_{1-x}$ /p-Si diyotun şematik diyagramı Şekil 1'de gösterilmektedir.





Şekil 1. Bir Al/Mn<sub>x</sub>ZnO<sub>1-x</sub>/p-Si diyotun şematik diyagramı

## 2. BULGULAR VE TARTIŞMA

Metal-oksit/saydam iletken oksit-yarıiletken (MOS) tipi Schottky engel diyotlar için idealite faktörü  $n>1$  ise, termiyonik emisyon (TE) teorisine göre akım-gerilim ilişkisi ( $V \geq 3kT/q$  için) (Sze ve N.G (2007); Rhoderic ve Williams (1988))

$$I = I_o \exp\left(\frac{qV - IR_s}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-q(V - IR_s)}{kT}\right)\right] \quad (3.1)$$

ile verilir. Burada  $V$  diyot üzerine uygulanan gerilim,  $k$  Boltzmann sabiti,  $T$  Kelvin cinsinden sıcaklık ve  $IR_s$  terimi ise diyotun seri direnci üzerine düşen voltajdır. Ancak düşük ve orta gerilim bölgelerinde  $IR_s$  terimi diyota uygulanan voltaj yanında ihmal edilecek kadar küçüktür.  $I_o$  terimi ise ters doyum akımı olup

$$I_o = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{Bo}}{kT}\right) \quad (3.2)$$

eşitliği ile verilir. Burada  $\Phi_{Bo}$  metal ile yarıiletken arasında oluşan sıfır-beslem (ön-gerilim) potansiyel engel yüksekliği,  $A$  diyotun doğrultucu kontak alanı ve  $A^*$  etkin Richardson sabiti olup değeri ZnO için  $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$  dir [5]. İdealite faktörü  $n$  doğru ön-gerilim  $\ln I-V$  eğrilerinin eğiminden Eş. (3.1)'e göre elde edilebilir.

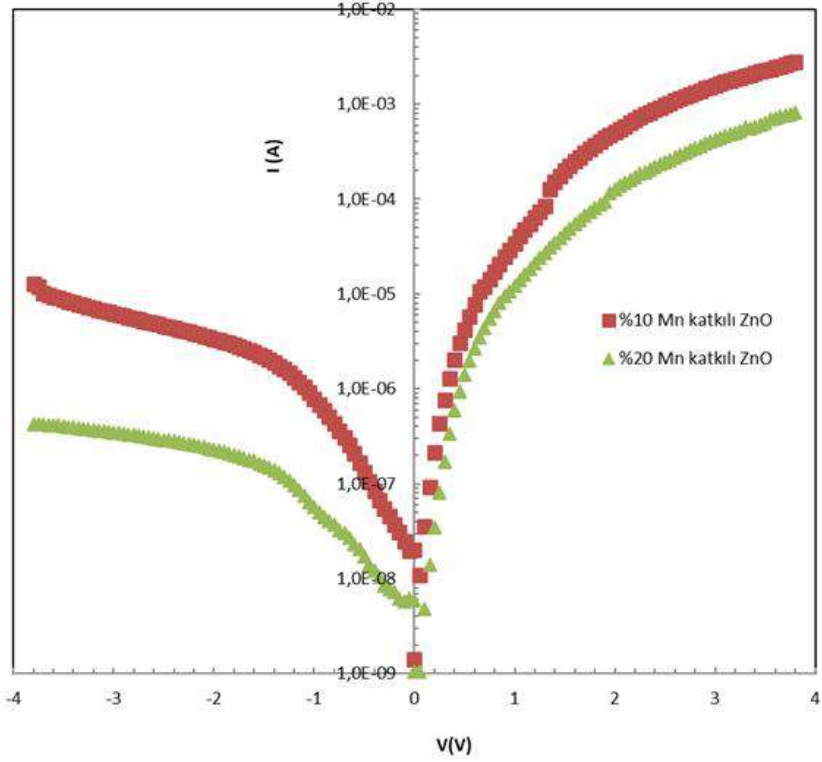
$$n = \frac{q}{kT} \left( \frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (3.3)$$

Genellikle idealite faktörü değeri 1'den büyüktür ve bu yüksek değer engel homojensizliklerine, yapının seri direncine, ZnO filmin varlığına ve ZnO/Si arayüzeyindeki arayüzey durumlarının özel bir dağılımına atfedilebilir [6,7]. Sıfır-beslem potansiyel engel yüksekliği ( $\Phi_{Bo}$ ) Eş. 3.2 kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\Phi_{Bo} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{AA^*T^2}{I_o} \right) \quad (3.4)$$

Diyotların yarı-logaritmik I-V eğrileri Şekil 2'de gösterilmiştir. Bunun yanı sıra diyotların  $n$ ,  $I_o$ ,  $\Phi_{Bo}$  temel elektriksel parametreleri Tablo 1'de verilmektedir.

Şekil 2 ve Tablo 1'de görüldüğü gibi Mn katkı oranı artırıldığında sızıntı akımının, idealite faktörün azaldığı bariyer yüksekliğinin arttığı görülmektedir. Ayrıca %20 Mn katkılı ZnO arayüzey tabakanın diyotun +4 V ve -4 V'daki akım değerleri kullanılarak doğrultma oranını ( $RR = I_F/I_R$ ) yaklaşık 7 kat artırdığı görülmektedir.



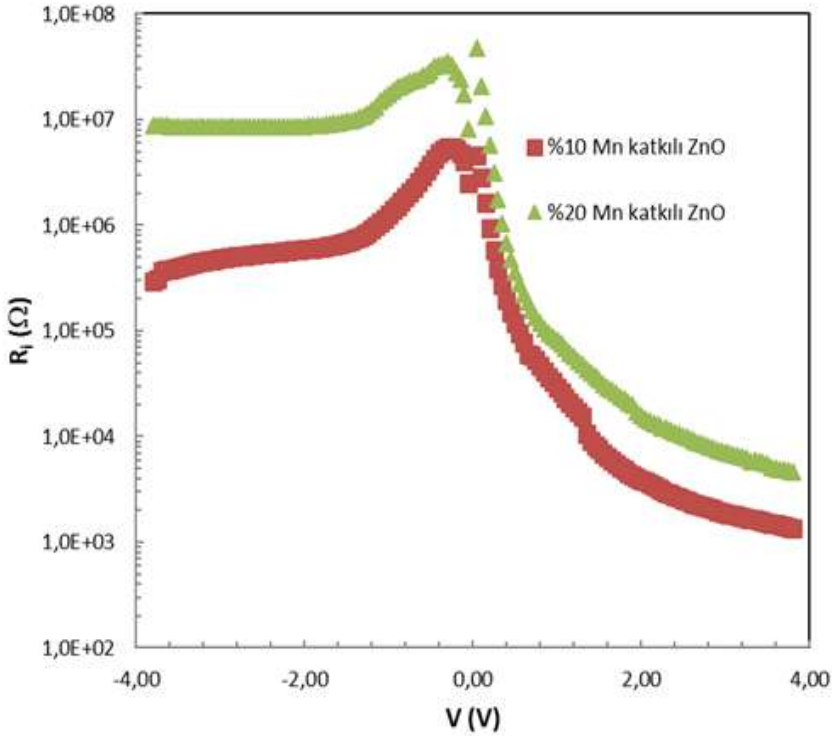
**Şekil 2.** Bir Al/Mn<sub>x</sub>ZnO<sub>1-x</sub>/p-Si diyotun şematik diyagramı

**Tablo 1.** Au/MnZnO/p-Si diyotların temel elektriksel parametreleri.

Örnek	I <sub>o</sub> (A)	n	Φ <sub>B0</sub> (eV)	D.O.
%10 Mn katkılı ZnO	1.72x10 <sup>-8</sup>	3.41	0.731	306.86
%20 Mn katkılı ZnO	1.81x10 <sup>-9</sup>	2.82	0.787	2031.25

Saydam iletken oksit içeren arayüzey tabakasına sahip (MOS) Schottky diyotlar ile bu yapıya dayalı fotodiyot ve fotodedektör gibi aygıtların elektriksel performansını ve ideal çalışma koşullarını belirleyen en

kritik faktörlerden biri, yapının seri direnci ( $R_s$ ) ve sızıntı akımlarını engelleyen şönt direncidir ( $R_{sh}$ ). İdeal bir Schottky diyot için seri direncin çok düşük ( $R_s \rightarrow 0$ ) şönt direncin ise çok yüksek olması beklenir ( $R_{sh} \rightarrow \infty$ ). Au/MnZnO/p-Si diyotların seri  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri I-V verilerinden Ohm yasası ( $R_i = dV_i/dI_i$ ) kullanılarak hesaplanabilir. Yeterince yüksek ileri ön gerilimde diyotların  $R_s$  değerleri, ters ön gerilimde ise diyotların  $R_{sh}$  değerleri belirlenebilir.



**Şekil 3.** Farklı oranda Mn katkılanması ile elde edilen diyotların  $R_i$ -V eğrileri.

Şekil 3’de diyotların  $R_i$ -V eğrileri verilmektedir. % 10 Mn katkılı diyot için  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri sırasıyla 1.3 k $\Omega$  ve 298 k $\Omega$  elde edilirken, % 20 Mn katkılı diyot için sırasıyla 4.4 k $\Omega$  ve 890 k $\Omega$  elde edilmiştir.

$R_s$  ve  $\Phi_B$  değerleri Norde'nin geliştirdiği alternatif metot kullanılarak aşağıdaki eşitliklerden hesaplanabilir (Norde, 1979).

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (3.5)$$

Buradaki  $\gamma$  idealite faktöründen büyük bir sabittir. F(V)-V eğrisinin minimum değeri belirlendikten sonra bariyer yüksekliği ve seri direnç değeri hesaplanabilir:

$$\Phi_B = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (3.6)$$

$$R_s = \frac{(\gamma-n)kT}{qI_{min}} \quad (3.7)$$

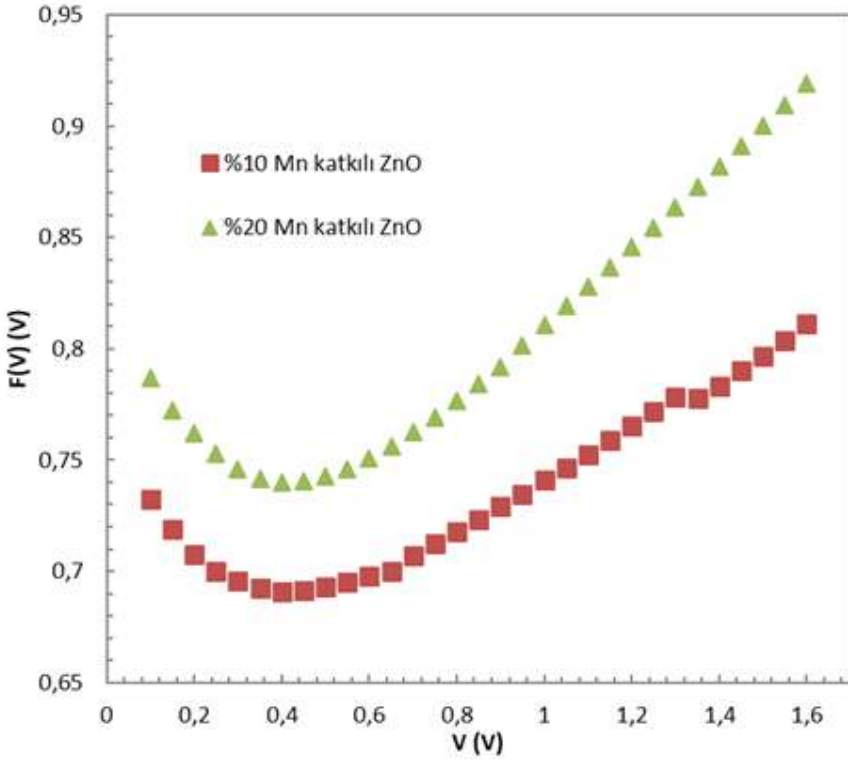
Burada  $I_{min}$  F(V) nin minimum verdiği voltaj değerine karşılık gelen akım değeridir. Şekil 4’de katkılama oranına bağlı F(V)-V eğrisi gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Au/MnZnO/p-Si diyotların iki farklı metottan elde edilen  $R_s$  ve  $\Phi_B$  değerleri

<b>Örnek</b>	<b><math>\Phi_B</math> (eV) (I-V metod)</b>	<b><math>\Phi_B</math> (eV) (Norde Y.)</b>	<b><math>R_s</math> (k<math>\Omega</math>) (Ohm Y.)</b>	<b><math>R_s</math> (k<math>\Omega</math>) (Norde Y.)</b>
%10 Mn katkılı ZnO	0.731	0.866	1.3	2.9
%20 Mn katkılı ZnO	0.787	0.915	4.4	13.8

Tablo 2'de  $I-V$  metodundan ve Norde metodundan elde edilen bariyer yüksekliği ve seri direnç değerleri görülmektedir. İki farklı metottan elde edilen değerlere bakıldığında Norde metodundan elde edilen değerlerin daha yüksek olduğunu görüyoruz.

Bariyer yüksekliğini hesaplariken I-V metodunda sadece lineer bölgenin eğimi alınır Norde metodu ise tüm doğru ön-gerilim bölgesinde uygulanmaktadır. Seri direncin yüksek değerlerinden akım sınırlayıcı bir faktör olduğu sonucu çıkarılabilir.



**Şekil 4.** Farklı oranda Mn katkılanması ile elde edilen diyotların F(V)-V eğrileri.

Elektriksel kontakların yarıiletken cihaz uygulamalarındaki kritik rolü iyi bilinmesine rağmen, Schottky bariyer kontrolü hala büyük bir zorluk teşkil etmektedir.

Metal-yarıiletken (M/Y) arayüzünün lokalize arayüz tuzakları (Dit), safsızlıklar, dipoller ve arayüzey tabakası gibi parametreler bariyer yüksekliğini değiştirebilir. Bu tuzaklar, cihazın yük taşıma mekanizmasını ve taşıyıcı yeniden kombinasyon süreçlerini etkiler. En iyi cihaz performansı için bu tuzaklar belli bir seviyenin altında tutulmalıdır.

Metal ile arayüzey durumları arasındaki tünelleme etkileşimi, arayüzey tabakasının kalınlığının artmasıyla birlikte azalır. Metal-yarıiletken (M/Y) arayüzeyinde yer alan tuzak yükleri, yarıiletkenin yasak enerji bölgesinde bulunan enerji seviyeleri ile birlikte lokalize olmuş durumlar oluşturur. Arayüzey tabakasının kalınlığı  $\delta > 30\text{\AA}$  olduğu durumda bu yükler yarıiletken tarafından kontrol edilir (Sze ve N.G (2007).

Arayüzey durumlarının enerjiye bağlı yoğunluk profili, etkin engel yüksekliğinin ( $\Phi_e$ ) voltaj değişimine bağlı olarak gösterdiği varyasyon dikkate alınarak hesaplanabilir. Metal-p tipi bir yarıiletkende, arayüzey durumlarının enerjisi ( $E_{ss}$ ), valans bandının en üst seviyesine göre tanımlanabilir.

$$E_{ss} - E_v = q(\Phi_e - V) \quad (3.8)$$

eşitliği ile verilir.  $\Phi_e$ 'nin gerilime göre değişimi;

$$\frac{d\Phi_e}{dV} = 1 - \frac{1}{n(V)} \quad (3.9)$$

şeklinde verilir. Bu değişim arayüzey durumlarının ve MnZnO tabaka kalınlığının ortak etkisini içeren bir parametredir. Sonuçta  $\Phi_e$ , Eş. (3.10)'daki gibi ifade edilir (Card and Rhoderick (1971); Altındal v.d. (2019)

$$\Phi_e = \Phi_{bo} + \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right)(V - IR_s) \quad (3.10)$$



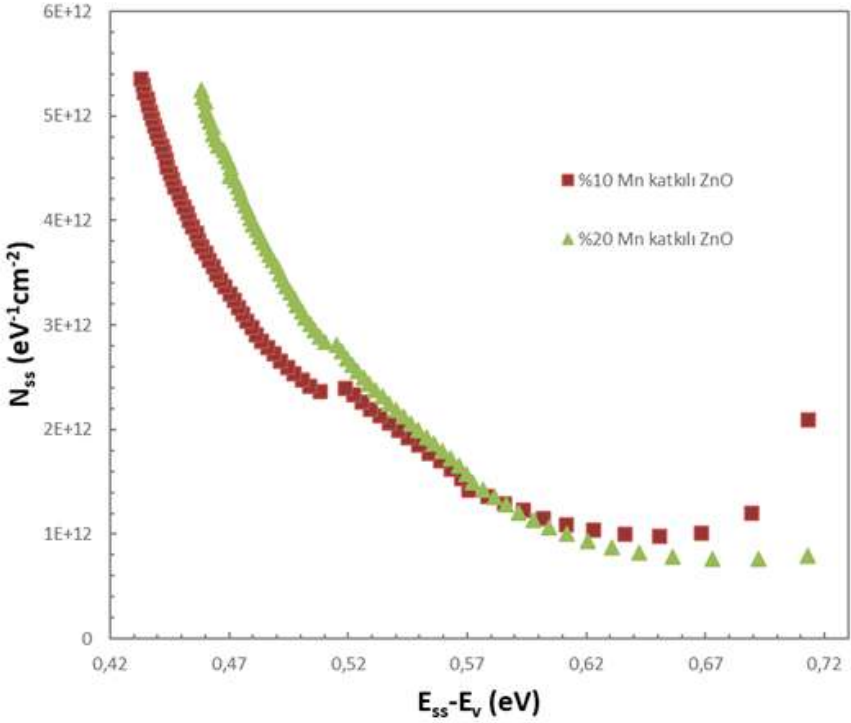
Arayüzey durum yoğunluğunun ( $N_{ss}$ ) dağılım profili enerjinin bir fonksiyonu olarak Şekil 5'de verilmiştir. İdealite faktörünü, MnZnO tabakanın kalınlığı ( $\delta$ ) ve  $N_{ss}$  niceliklerine bağlayan ifade

$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left[ \frac{\epsilon_s}{W_D} + qN_{ss}(V) \right] \quad (3.11)$$

şeklinde verilir. Burada  $W_D$  uzay yükü tabakasının kalınlığı,  $\epsilon_s$  ve  $\epsilon_i$  sırasıyla yarıiletkenin ve arayüzey tabakanın dielektrik sabitlerdir. Arayüzey tabakanın kalınlığı  $\delta$ , yüksek frekanstaki (1 MHz) C-V karakteristiklerinden yararlanarak  $C_{ox} = \epsilon_i \epsilon_o A / \delta$  eşitliğinden elde edilmiştir. Eş. 3.11'dan yararlanılarak gerilime bağlı  $N_{ss}(V)$  değerleri,

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[ \frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{W_D} \right] \quad (3.12)$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 5'de,  $N_{ss}$  değerlerinin valans bandının tepesinden yarıiletkenin yasak enerji aralığının ortasına kadar üstel bir büyümeye sahip olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.** Farklı oranda Mn katkılanması ile elde edilen diyotların  $N_{ss}$ -V eğrileri.

Arayüzey durum yoğunluğu değerleri %10 Mn katkılı ZnO arayüzey tabakalı diyot için  $0.432-E_v$  seviyesinde  $5.35 \times 10^{12} eV^{-1}cm^{-2}$  değerinden  $0.712-E_v$  seviyesinde  $2.10 \times 10^{12} eV^{-1}cm^{-2}$  değerine değişmektedir. %20 Mn katkılı ZnO arayüzey tabakalı diyot için ise  $N_{ss}$  değerleri  $0.458-E_v$  seviyesinde  $5.25 \times 10^{12} eV^{-1}cm^{-2}$  değerinden  $0.713-E_v$  seviyesinde  $7.96 \times 10^{11} eV^{-1}cm^{-2}$  değerine değişmektedir. Bu değerler literatürle kıyaslandığında pratik uygulamalar açısından ideal seviyede kabul edilebilir. Bu durumda arayüzey tabakanın varlığı metal

ile yarıiletken arasındaki teması engelleyerek, yüzey pasivasyonu sağlar. Bu sayede yük taşıma mekanizmaları kontrol edilebildiği için idealite faktörü, Schottky engel yüksekliği ve sızıntı akımı gibi parametreleri de iyileştirir.

### 3. SONUÇ

Saydam iletken oksitler grubunda yer alan ZnO filmler optoelektronik ve mikroelektronik teknolojilerinde çok yönlü uygulamalara sahip malzemeler olarak öne çıkmıştır. Geniş bant aralığına sahip olmaları ve düşük maliyet ile üretilebilme avantajlarının yanı sıra katkılama yöntemleriyle bu malzemelerin performansı artırılabilir.

Son yıllarda geçiş metalleriyle katkılamanın ZnO materyalinde ilginç özellikler ortaya çıkardığı görülmüştür. Literatürde, Mn katkısı ZnO filmlerde kullanılmıştır fakat daha çok bu katkılamanın filmlerin yapısal, optik ve magnetik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Mn katkısının bu tür ince filmlerin elektrik ve dielektrik özelliklerine etkisi inceleyen yeteri kadar araştırma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada %10 ve %20 Mn katkılı ZnO filmler p-Si üzerine sol-jel spin kaplama yöntemiyle büyütülmüş Al/MnZnO/p-Si Schottky diyotlar elde edilmiştir. Mn katkı oranı artırıldığında diyotun idealite faktörünün ve sızıntı akımının azaldığı; Schottky engel yüksekliği, şönt direnci ve doğrultma oranının da arttığı gözlenmiştir.

Arayüzey durum yoğunluğun  $10^{11}$ - $10^{12}$  eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup> mertebesinde olması optimum elektriksel özellikler ve aygıt performansı açısından ideal kabul edilmektedir.

## KAYNAKÇA

Reddy N.N.K., Vattikuti S.V.P., Verma V.K., Singh V.R., Alhammadi S., Kummara V.K., Manjunath V., Dhanalakshmi M., Reddy V.R.M., (2022). Highly sensitive and cost-effective metal-semiconductor-metal asymmetric type Schottky metallization based ultraviolet photodetecting sensors fabricated on n-type GaN. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 138, 106297.

<https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106297>

Shao G., Wang J., Wang Y., Wang W., Wang H-X, (2022). Inhomogeneous heterojunction performance of Zr/diamond Schottky diode with Gaussian distribution of barrier heights for high sensitivity temperature sensor. *Sensors and Actuators A:Physical*, 347 113906.

<https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106297>

Yang Z., Li L., Zuo Z., Liu J.L., (2009). Temperature-dependent photoluminescence of CdZnO thin films grown by molecular-beam epitaxy. *J. Cryst. Growth* 312, 68.

<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgr.2009.10.013>

Jagdish C., Pearton S.J. (2011). *Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures: Processing, Properties, and Applications*. Elsevier, Amsterdam.

Taşçioğlu İ., Farooq W.A., Turan R., Altındal Ş. and Yakuphanoglu F. (2014). Charge transport mechanisms and density of interface traps

- in MnZnO/p-Si diodes. *J. Alloys and Comp.* 590, 157-161.  
<http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.12.043>
- Han, J., Mantas, P.Q., Senos A.M.R. (2001). Effect of Al and Mn doping on the electrical conductivity of ZnO. *J.Eur. Cer. Soc.* 21 1883-1886. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(01\)00136-4](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(01)00136-4)
- Oshio, T., Masuko, K., Ashida, A., Yoshimura, T., Fujimura, N. (2008). Effect of Mn doping on the electric and dielectric properties of ZnO epitaxial films. *J. Appl. Phys.* 103 093717.  
<https://doi.org/10.1063/1.2905315>
- Foo, K.L., Kashif M., Hashim U., Ali M.E. (2013). Sol-gel derived ZnO nanoparticulate films for ultraviolet photodetector (UV) applications. *Optik* 124 5373–5376.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.03.120>
- Yakuphanoglu F., Çağlar Y., Çağlar M., Ilıcan S. (2012). Electrical characterization of the diodes-based nanostructure ZnO:B. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 58, 30101-30101-8.  
<https://doi.org/10.1051/epjap/2012120035>
- Atay F, Akyuz I., Durmaz D., Kose S. (2019). Characterization of ZnO-SnO<sub>2</sub> oxide systems produced by ultrasonic spray pyrolysis. *Solar Energy* 193 666-675. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.012>
- Lin T.K., Chang S.J., Su Y.K., Huang B.R., Fujita M., Horikoshi Y. (2005). ZnO MSM photodetectors with Ru contact electrodes. *J. Cryst. Growth*, 281 513-517.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.04.056>

- Liang S., Shen H., Liu Y., Huo Z., Lu Y., Shen H. (2001). ZnO Schottky ultraviolet photodetectors J. Cryst. Growth, 225 110-113  
[https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(01\)00830-2](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)00830-2).
- Cao B., Cai W., Zeng H., Duan G. (2006). Morphology evolution and photoluminescence properties of ZnO films electrochemically deposited on conductive glass substrates J. Appl. Phys 99 073516-073516-6. <https://doi.org/10.1063/1.2188132>
- Sze, S. M., Ng K. K. (2007). Physics of semiconductor devices 3rd edition, John Wiley & Sons, New Jersey, 30
- Rhoderick, E. H. and Williams R. H. (1988). Metal Semiconductor Contacts, Oxford Press, 257-264.
- Norde H. (1979). A modified forward I - V plots for Schottky diodes with high series resistance J. Appl. Phys, 50, 5052-5053.  
<https://doi.org/10.1063/1.325607>.
- Card, H.C., Rhoderick, E.H. (1971). Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes. J Phys D: Appl. Phys. 4, 1589.
- Altındal Ş, Sevgili Ö., Azizian-Kalandaragh Y. (2019). A comparison of electrical parameters of Au/n-Si and Au/(CoSO<sub>4</sub>-PVP)/n-Si structures (SBDs) to determine the effect of (CoSO<sub>4</sub>-PVP) organic interlayer at room temperature Journal of Materials Science: Materials in Electronics 30 9273–9280.  
<https://doi.org/10.1007/s10854-019-01257-5>.





# MÜHENDİSLİKTE YENİLİKÇİ MALZEME, ÇEVRE VE GÜVENLİK ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

ISBN: 978-6-25592-318-9

