T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDROTERMAL YOLLA ÜRETİLEN KATKILI MAGNEZYUM BORAT ÖRNEKLERİNİN ENDÜSTRİYEL BOYALARIN ATIK SULARDAN ARITIMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Büşranur AK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Emek DERUN

Eş Danışman

Doç. Dr. Fatma Tuğçe DUMANLI

Şubat, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDROTERMAL YOLLA ÜRETİLEN KATKILI MAGNEZYUM BORAT ÖRNEKLERİNİN ENDÜSTRİYEL BOYALARIN ATIK SULARDAN ARITIMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Büşranur AK tarafından hazırlanan tez çalışması 03.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Kimya Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Emek DERUN Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman	Doç. Dr. Fatma Tuğçe DUMANLI Nişantaşı Üniversitesi Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Emek DERUN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Nurcan TUĞRUL, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Tülin Banu İYİM, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Emek DERUN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Hidrotermal Yolla Üretilen Katkılı Magnezyum Borat Örneklerinin Endüstriyel Boyaların Atık Sulardan Arıtımında Değerlendirilmesi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Büşranur AK

İmza

Bu çalışma, “İstanbul Nişantaşı Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün BAP2022/18” numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Aileme

ve

eşime

TEŞEKKÜR

2024 – 2025 Güz Dönemi Kimya Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Bitirme Tezi ‘‘Hidrotermal Yolla Üretilen Katkılı Magnezyum Borat Örneklerinin Endüstriyel Boyaların Atık Sulardan Arıtımında Değerlendirilmesi’’ isimli çalışmamda her türlü fedakarlık ve yardımlarını esirgemeyen, çalışmalarıma yön veren, araştırmamın her aşamasında değerli bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan Tez Danışmanım Prof. Dr. Emek DERUN hocama verdiği emeği ve paylaştığı tecrübeleri için sonsuz teşekkür ederim.

Lisansüstü öğrenimim süresince ilgisi ve tecrübesiyle deneysel çalışmalarım sırasında bana her türlü imkanı sağlayan, her daim fikir ve tavsiyelerinden yararlandığım saygıdeğer hocam Doç. Dr. Fatma Tuğçe DUMANLI’ ya, deneylerin yürütülmesinde ve deneysel verilerin yorumlanmasında yardımcı olan Sayın Prof. Dr. Azmi Seyhun KIPÇAK’A, çalışmamın her türlü bölümünde bana yol gösteren ve destek olan hocalarımdan sayın Arş. Gör. Enis Muhammet GÜL’ e,

Bütün eğitim hayatım boyunca gösterdikleri sabır, hoşgörü ve destek için sevgili annem ve babama, bu süreci benimle ilk derecede paylaşan, manevi ve maddi katkılarıyla her zaman yanımda olan, hayat boyu ilham ve moral kaynağım olan sevgili eşim Taha Yasin AK’a teşekkür etmek isterim.

Büşranur AK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ ix

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xiii

HARİTA LİSTESİ xv

ÖZET xvi

ABSTRACT xviii

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1

1.2 Tezin Amacı 5

1.3 Hipotez 6

2 BOR 7

2.1 Bor Elementi 7

2.2 Bor Mineralleri 9

2.2.1 Hidrojen Boratlar 12

2.2.2 Sodyum Boratlar 13

2.2.3 Sodyum Kalsiyum Boratlar 14

2.2.4 Kalsiyum Boratlar 16

2.2.5 Kalsiyum Borasilikatlar 20

2.2.6 Magnezyum Boratlar 22

2.2.7 Diğer Boratlar 24

2.3 Borun Kullanım Alanları 24
2.4 Türkiye ve Dünyadaki Durum 31
2.4.1 Türkiye'deki Durumu 31
2.4.2 Dünyadaki Durumu 34
2.5 Borun Önemi 37
3 MAGNEZYUM BORAT 38
3.1 Magnezyum Borat Mineralleri 38
3.1.1 Kristal Sulu Magnezyum Boratlar 40
3.1.2 Susuz Magnezyum Boratlar 43
3.1.3 Klor İçerikli Magnezyum Boratlar 45
3.2 Üretim Yöntemleri 47
3.2.1 Hidrotermal Yöntem 48
3.2.2 Termal Yöntem 50
4 ATIK SU 52
4.1 Atık Sular 52
4.1.1 Evsel Atık Su 52
4.1.2 Tarımsal Atık Su 53
4.1.3 Endüstriyel Atık Su 53
4.2 Atık Su Arıtma Yöntemleri 54
4.2.1 Fiziksel Arıtma Prosesleri 55
4.2.2 Biyolojik Arıtma Prosesleri 55
4.2.3 Kimyasal Arıtma Prosesleri 57
4.3 Kongo Kırmızısı Gideriminde Kullanılan Atık Su Arıtma Yöntemleri 58
5 BOYAR MADDE 59
5.1 Boyar Madde 59
5.1.1 Kongo Kırmızısı 60

6 DENEYSEL ÇALIŞMALAR **62**

6.1 Kullanılan Malzemeler 62

6.2 Üretim Yöntemi 63

6.2.1 Katkısız Üretim 65

6.2.2 Kapayıcı Ajan Katkılı Üretim 65

6.3 Boya Çözeltilerinin Hazırlanması ve Fotobozunma İşlemi 66

6.3.1 Bilgisayar Destekli Modelleme 69

7 DENEYSEL SONUÇLAR **74**

7.1 Karakterizasyon Sonuçları 74

7.1.1 XRD Analiz Sonuçları 74

7.1.2 SEM Analiz Sonuçları 77

7.1.3 TEM Analiz Sonuçları 81

7.1.4 UV-Vis Spekstroskopisi Sonuçları 82

7.2 Fotobozunma Sonuçları 83

7.2.1 Design Expert Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar 83

7.2.2 Magnezyum Borat ile Yapılan Çalışmalarda Fotobozunmasına Etki Eden Faktörler 87

7.2.3 Optimum Koşullar İçin Katkısız ve Kapayıcı Ajan Katkılı Magnezyum Borat Sonuçları 88

8 SONUÇ **90**

8.1 Sonuçlar 90

KAYNAKÇA **94**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **106**

SİMGE LİSTESİ

As	Arsenik
Cu	Bakır
B	Bor
C_0	Boya Başlangıç Konsantrasyonu
θ	Bragg Açısı
α	Dönüşüm Katsayısı
°F	Fahrenheit
GPa	Gigapascal
HCl	Hidroklorik Asit
β	Isıtma Hızı
x	Kalınlık
Ca	Kalsiyum
K	Kelvin
kJ	Kilojoule
kV	Kilovolt
R^2	Korelasyon Değeri
λ	Lamda
Mg	Magnezyum
µm	Mikrometre
mA	Miliamper
nm	Nanometre
°C	Santigrat
Si	Silisyum
Na	Sodyum
NaOH	Sodyum Hidroksit
Sr	Stronsiyum
C_t	t Anındaki Boya Konsantrasyonu

KISALTMA LİSTESİ

AAT	Atık Su Arıtma Tesisi
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ANOVA	Varyans Analizi
Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
CTAB	Setil-Trimetil-Amonyum Bromit
CV	Varyasyon Katsayısı
df	Serbestlik Dereceleri
dk	Dakika
DNA	Deoksiriboz Nükleik Asit
EDX	Enerji Dağıtıcı X-Işını Analizi
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi
FWHM	Tam Genişliği Yarı Maksimumda Tanımlama
GFL	Gesellschaft für Labortechnik
KK	Kongo Kırmızısı
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
OA	Oleik Asit
PVP	Polivinilpirolidon
RSM	Cevap Yüzey Yöntemi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Std	Standart
STEM	Taramalı Transmisyon Elektron Mikroskobu
TEM	Transmisyon (Geçirimli) Elektron Mikroskobu
TG	Termogravimetrik
UV-Vis	UV-Vis Spektroskopisi
XRD	X-Işını Kırınım Yöntemi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Sassolit **12**
Şekil 2.2 Boraks, Tinkalkonit, Kernit **14**
Şekil 2.3 Üleksit **15**
Şekil 2.4 Probertit **16**
Şekil 2.5 Kolemanit **17**
Şekil 2.6 Pandermit **18**
Şekil 2.7 Nobleit **18**
Şekil 2.8 İnyoit **19**
Şekil 2.9 Meyerhofferit **20**
Şekil 2.10 Datolit **20**
Şekil 2.11 Danburit **21**
Şekil 2.12 Havlit **22**
Şekil 2.13 Tünelit **24**
Şekil 2.14 Bor tüketiminin nihai kullanım alanlarına göre dağılımı **29**
Şekil 2.15 Türkiye bor rezervleri cevher tipi ve oranları **33**
Şekil 2.16 2023 yılı Etimaden ihracat miktarı- bölgelere göre dağılım **34**
Şekil 2.17 2023 yılı bölgelere göre bor tüketimi **36**
Şekil 3.1 İnderit **40**
Şekil 3.2 Kurnakovit **41**
Şekil 3.3 Pinnoit **42**
Şekil 3.4 Admontit **42**
Şekil 3.5 Suanit **43**
Şekil 3.6 Katoit **44**
Şekil 3.7 Borasit **45**
Şekil 3.8 Shabinit **45**
Şekil 3.9 Karlit **46**
Şekil 3.10 Magnezyum borat mineralleri üretim yöntemleri **48**
Şekil 4.1 Fiziksel arıtma yöntemleri **55**
Şekil 4.2 Biyolojik arıtma prosesleri **56**

Şekil 4.3 Kimyasal arıtma prosesleri **57**
Şekil 5.1 Kongo Kırmızısı molekül yapısı **61**
Şekil 6.1 Deneylerde kullanılan Kongo Kırmızısı boyar maddesi **62**
Şekil 6.2 Manyetik karıştırıcı sistemi **63**
Şekil 6.3 Hidrotermal reaksiyon sonrası ürün yıkama vakum filtrasyon işlemi ... **64**
Şekil 6.4 Ecocell marka etüv **64**
Şekil 6.5 Kurutulduktan sonra magnezyum borat örneği **66**
Şekil 6.6 Kerman UV 21/13 marka UV reaktör **66**
Şekil 6.7 Elektromag M415 P Genel Amaçlı Santrifüj **67**
Şekil 6.8 KK boyar maddesine ait kalibrasyon eğrisi **68**
Şekil 6.9 752N Plus UV Vis- Spektrofotometre..... **69**
Şekil 6.10 X-Işını kırınım (XRD) cihazı **72**
Şekil 6.11 Yüksek çözünürlüklü analitik elektron mikroskobu **73**
Şekil 7.1 Hidrotermal metot ile 100^{o}C' de sentezlenen ürünlerin XRD desenleri **76**
Şekil 7.2 Üretilen katkısız magnezyum boratın yüzey morfolojileri (BHT-0)..... **77**
Şekil 7.3 Üretilen Oleik Asit katkılı magnezyum boratın yüzey morfolojileri (BHT-1) **78**
Şekil 7.4 Üretilen CTAB katkılı magnezyum boratın yüzey morfolojileri (BHT-2) **79**
Şekil 7.5 Üretilen PVP katkılı magnezyum boratın yüzey morfolojileri (BHT-3)**80**
Şekil 7.6 Üretilen magnezyum boratın TEM görüntüsü..... **81**
Şekil 7.7 Katkılı ve katkısız üretilen magnezyum boratın UV-vis absorpsiyon spektrumları **82**
Şekil 7.8 Modelin tahmin değerlerine karşı gerçek değeri **86**
Şekil 7.9 KK adsorpsiyonunun başlangıç konsantrasyonu ve temas süresi ile değişimini gösteren 3D yüzey..... **87**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Bor elementinin fiziksel özellikleri **8**
Tablo 2.2 Ticari öneme sahip başlıca bor mineralleri **11**
Tablo 2.3 Borik asit fiziksel özellikleri **13**
Tablo 2.4 Boraks fiziksel özellikleri **14**
Tablo 2.5 Üleksit fiziksel özellikleri **15**
Tablo 2.6 Probertit fiziksel özellikleri **16**
Tablo 2.7 Kolemanit fiziksel özellikleri **17**
Tablo 2.8 Pandermit fiziksel özellikleri **18**
Tablo 2.9 Nobleit fiziksel özellikleri **19**
Tablo 2.10 İnyoit fiziksel özellikleri **19**
Tablo 2.11 Meyerhofferit fiziksel özellikleri **20**
Tablo 2.12 Datolit fiziksel özellikleri **21**
Tablo 2.13 Danburit fiziksel özellikleri **21**
Tablo 2.14 Havlit fiziksel özellikleri **22**
Tablo 2.15 Tünelit fiziksel özellikleri **24**
Tablo 2.16 Bor'un kullanım alanları **30**
Tablo 2.17 Türkiye borat yataklarında bulunan bor mineralleri (+ var, - yok) ... **32**
Tablo 2.18 Eti Maden rezerv miktarları **33**
Tablo 2.19 Dünya bor rezervleri **36**
Tablo 3.20 Magnezyum Borat Mineralleri **38**
Tablo 3.21 İnderit fiziksel özellikleri **41**
Tablo 3.22 Kurnakovit fiziksel özellikleri **41**
Tablo 3.23 Pinnoit fiziksel özellikleri **42**
Tablo 3.24 Admontit fiziksel özellikleri **43**
Tablo 3.25 Suanit fiziksel özellikleri **44**
Tablo 3.26 Katoit fiziksel özellikleri **44**
Tablo 3.27 Borasit fiziksel özellikleri **45**
Tablo 3.28 Shabinit fiziksel özellikleri **46**
Tablo 3.29 Karlit fiziksel özellikleri **46**

Tablo 6.1 Magnezyum borat sentezi için deneysel parametreler **64**
Tablo 6.2 Kongo Kırmızısı boyası-RSM için deneysel parametreler **67**
Tablo 7.1. Sentezlenen ürünlerin isimlendirilmesi **74**
Tablo 7.2 Sentezlenen ürünlere ait XRD bilgileri **75**
Tablo 7.3 Sentezlenen ürünlere ait XRD skorları **75**
Tablo 7.4 Kongo Kırmızısı fotobozunmasında kullanılan faktörler ve seviyeleri **83**
Tablo 7.5 Yanıt yüzeyi yöntemiyle tasarlanan deneysel verilerin ile KK % giderim sonuçları **84**
Tablo 7.6 KK giderimi için ANOVA analizi sonuçları **84**
Tablo 7.7 Belirlenen kuadratik model sonuçlarının istatistiksel sonuçları **85**
Tablo 7.8 Katkısız ve kapayıcı ajan katkılı optimum deney set parametreleri **88**
Tablo 7.9 Yanıt yüzeyi yöntemiyle tasarlanan deneysel verilerin ile KK % giderim sonuçları **89**
Tablo 8.1. Literatürde yapılan çalışmalar ve % fotobozunma verileri **92**

HARİTA LİSTESİ

Harita 2.1 Türkiye bor madeni haritası..... 31
Harita 2.2 Dünya bor madeni rezerv haritası..... 35

ÖZET

Hidrotermal Yolla Üretilen Katkılı Magnezyum Borat Örneklerinin Endüstriyel Boyaların Atık Sulardan Arıtımında Değerlendirilmesi

Büşranur AK

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Emek DERUN

Eş-Danışman: Doç. Dr. Fatma Tuğçe DUMANLI

Atık suyun içerdiği, insan ve çevre sağlığı açısından son derece tehlikeli olan Kongo kırmızısı boyar maddesinin, ülkemizde yaygın olarak bulunan bor madeni kullanılarak, fotobozunma yöntemiyle atık sudan uzaklaştırılması için laboratuvar ortamında bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Hidrotermal yöntemle sentezlenen magnezyum borat örnekleri üretiminde katkısız ve kapayıcı ajan katkılı (Oleik asit, CTAB ve PVP) kullanılarak üretimler gerçekleştirilerek magnezyum boratlar elde edilmiştir. Elde edilen örnekler kullanılarak sulu çözeltilerden Kongo Kırmızısı fotobozunması araştırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hazırlanan magnezyum borat örnekleri X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Geçirimli (transmisyon) elektron mikroskobu (TEM) gibi yöntemlerle karakterize edilmiştir. Sentezlenen katkısız Magnezyum borat örneklerinin XRD sonucunda Admontite "01-076-0540, $MgO(B_2O_3)_3(H_2O)_7$" elde edilmiş olup, kapayıcı ajan katkılı üretimlerde ise hem Admontit hem de Magnezyum borat hidrat yapısına

sahip "01-076-0539, $MgO(B_2O_3)_3(H_2O)_6$" üretilmiştir. Ortaya çıkan Admontit, ve magnezyum borat hidrat monoklinik bir kafes yapısına ve yüksek bir XRD puanına sahiptir. Elde edilen numunelerin SEM ve TEM spektrumları karşılaştırılmıştır. SEM ve TEM görüntüleri incelendiğinde morfolojik yapısı ve tanecik büyüklüğü olarak en uygun CTAB kapayıcı ajan kullanımında gözlemlenmiştir. Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan boya çözeltilerine farklı kütlelerde Magnezyum Borat ilave edilerek UV reaktöründe fotobozunma yöntemiyle renk giderimi araştırılmıştır. Kütle (0.01, 0.06 ve 0.10 gram), temas süresi (5, 30 ve 60 dk) ve başlangıç konsantrasyonu (10, 30 ve 50 ppm) parametreleri arasındaki ilişki, yanıt yüzeylerinden biri olarak Box-Behnken tasarımı kullanılarak analiz edilmiştir. Araştırma sonucunda farklı kütlelerdeki magnezyum boratın atıksulardan etkin renk giderimi sağladığı görülmüştür. Fotokatalist başlangıç boya konsantrasyonu, fotokatalist miktarının ve dokusal yapısının fotobozunma kapasitesinde önemli rol oynadığı tespit edilmiştir. Kongo Kırmızısı boyarmadde atıksu arıtımında optimum ekstraksiyon koşulları başlangıç konsantrasyonu 30 ppm, fotokatalist miktarı 0,06 gram ve temas süresi 25 dakika olarak belirlenmiştir. 13 deneyin her birinin hangi koşullar altında yapılması gerektiği üzerinde yapılan Varyans (ANOVA) analizi sonucunda, deneysel çalışmalar sonucunda sistem üzerinde alınan cevaplar doğrultusunda uygun modelin belirlendiği belirlenmiştir. Matematiksel olarak İndirgenmiş Kuadratik Modele uymaktadır. Araştırmalar, potansiyel bir fotokatalist olan magnezyum boratın, boya içeren atık suyun ekstraksiyonunda başarıyla kullanılabileceğini kanıtlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Box-Behnken, Kongo Kırmızısı, Magnezyum Borat, Fotobozunma, Atıksu arıtımı, Kapayıcı ajan, Fotokatalist

ABSTRACT

Evaluation of Additive Magnesium Borate Samples Produced by Hydrothermal Way in the Treatment of Industrial Dyes from Wastewater

Büşranur AK

Department of Chemical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Emek DERUN

Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatma Tuğçe DUMANLI

A laboratory study was carried out to remove Congo red dyestuff, which is extremely dangerous for human and environmental health, from wastewater by photodegradation method using boron, which is widely available in our country. In the production of magnesium borate samples synthesized by hydrothermal method, magnesium borates were obtained by using undoped and capping agent additives (Oleic acid, CTAB and PVP). Congo Red photodegradation from aqueous solutions was investigated using the samples obtained and the results were compared. The prepared magnesium borate samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). As a result of XRD of the synthesized undoped Magnesium borate samples, Admontite "01-076-0540, $MgO(B_2O_3)_3(H_2O)_7$" was obtained, and in the production with capping agent additives, both Admontite and Magnesium borate hydrate structure "01-076-0539, $MgO(B_2O_3)_3(H_2O)_6$" were produced. The

resulting Admontite and magnesium borate hydrate have a monoclinic lattice structure and a high XRD score. SEM and TEM spectra of the obtained samples were compared. When SEM and TEM images were examined, the most suitable CTAB capping agent was observed in terms of morphological structure and particle size. Color removal by photodegradation method in UV reactor was investigated by adding different masses of Magnesium Borate to the dye solutions prepared at different concentrations. The relationship between mass (0.01, 0.06 and 0.10 grams), contact time (5, 30 and 60 min) and initial concentration (10, 30 and 50 ppm) parameters were analyzed using Box-Behnken design as one of the response surfaces. As a result of the study, it was observed that magnesium borate at different masses provided effective color removal from wastewater. Photocatalyst initial dye concentration, photocatalyst amount and textural structure were found to play an important role in photodegradation capacity. The optimum extraction conditions for Congo Red dyestuff wastewater treatment were determined as initial concentration 30 ppm, photocatalyst amount 0.06 gram and contact time 25 minutes. As a result of the ANOVA analysis on the conditions under which each of the 13 experiments should be performed, it was determined that the appropriate model was determined in line with the responses received on the system as a result of the experimental studies. Mathematically, it fits the Reduced Quadratic Model. The investigations proved that magnesium borate, a potential photocatalyst, can be successfully used in the extraction of wastewater containing dyes.

Keywords: Box-Behnken, Congo Red, Magnesium Borate, Photodegradation, Wastewater treatment, Capping agent, Photocatalyst.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Binlerce yıldır insanlığın faydalandığı bor mineralleri ve bileşikleri, geçmişten günümüze uzanan bir kullanım yelpazesine sahiptir. Arkeolojik bulgular, bor tuzlarının ilk kez Tibet'te 4 bin yıl kadar önce kullanıldığını göstermektedir. Babiller, bu kıymetli maddeyi eritme işlemlerinde, Mısırlılar mumyalama sürecinde, Eski Yunanlılar ve Romalılar ise arena zeminlerini serpilerek temizlemede kullanmışlardır. 875 yılında ise bir dönüm noktası yaşanmış ve Araplar, bor tuzlarından ilk ilaçları üretmeyi başarmışlardır [1, 2].

Bu örnekler, bor minerallerinin ve bileşiklerinin insanlık tarihi boyunca ne kadar önemli bir rol oynadığını açıkça göstermektedir.

Endüstriyel açıdan büyük önem taşıyan bor bileşikleri, dünyanın farklı bölgelerinde çeşitli kaynaklardan elde edilmektedir [3].

Doğal bor bileşiklerine bakıldığında:

- Deniz suyu ve kaplıca suları: Bor, en yaygın olarak deniz suyunda ve yeraltı sularında bulunan bir elementtir. Özellikle kaplıca suları, yüksek oranda bor içerir.
- Toprak ve kayalar: Bor mineralleri, toprak ve kayalarda da bulunur. Bu minerallerin işlenmesi ile bor bileşikleri elde edilir.
- Bitkiler ve hayvanlar: Bazı bitki ve hayvan türleri de az miktarda bor içerir.

Bor bileşiklerinin bu kadar çeşitli kaynaklardan elde edilebilmesi, bu değerli madene olan ihtiyacın karşılanmasında önemli bir avantaj sağlamaktadır. Dünyadaki bor rezervlerinin %70' ine ev sahipliği yapan Türkiye, bu değerli

madenin küresel ticaretinde de önemli bir rol oynamaktadır. Bor madeni bakımından şanslı ülkelerden biri olan Türkiye, bu değerli kaynağın küresel üretiminin önemli bir kısmını gerçekleştirmekte ve uluslararası bir güç merkezi haline gelmektedir. [4].

Bor mineralleri çok stratejik ve değerli hammaddelerdir [5]. Günümüzde önemi giderek daha iyi anlaşılan mineraller arasında yer almaktadır.

Birçok modern endüstrinin endüstriyel borat minerallerine ihtiyacı vardır ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle boratlar ve ürünleri sürdürülebilir kalkınma açısından kritik öneme sahiptir [6]. Borik asit ve ürünleri metalurji, tıp, tarım ve nükleer endüstri gibi birçok alanda önemli bir rol oynamaktadır [7-10].

250'den fazla bor içeren mineral tanımlanmış olup en yaygın olanları sodyum, kalsiyum veya magnezyum tuzlarıdır [11].

Magnezyum bor cevheri, borik asit ve boraks dahil olmak üzere bor kimyasal ürünlerinin hazırlanmasında önemli bir hammaddedir ve Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Rusya ve İtalya'da yaygın olarak dağıtılmaktadır [8-12]. Türkiye'deki bor rezervlerinin genel dağılımına bakıldığında ise magnezyum boratın azınlıkta kaldığı görülmektedir [13]. Doğada farklı bileşimlerde rastlanan magnezyum borat bileşikleri, çeşitli sentez yöntemleriyle de elde edilebilen, son derece zengin bir bileşik yelpazesine sahiptir. Bu bileşikler, doğal kaynaklardan veya laboratuvar ortamında farklı yöntemler kullanılarak üretilebilmektedir. Magnezyum boratlar, titiz karakterizasyon çalışmaları sayesinde endüstriyel uygulamalarda önemli bir yer edinmiştir. Bu çalışmalar, magnezyum boratların farklı özelliklerinin keşfedilmesine ve bu özelliklerin çeşitli alanlarda değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

Magnezyum boratlar gelişmiş mekanik ve termal dayanıklılık özelliklerinden dolayı önemli bileşiklerdir. Bu grup mineraller olağanüstü özellikleri nedeniyle seramik endüstrisinde, deterjan endüstrisinde ve nötron koruyucu malzeme, termolüminesans fosforu olarak kullanılabilirler [14].

Magnezyumun biyouyumlu özelliğinden dolayı magnezyum borat bileşikleri aynı zamanda çevreye ve insan sağlığına zarar vermeyen bir biyomateryal olarak da değerlendirilmeye başlanmıştır. Bu bileşiklerin çevre dostu davranışları sağlık ve atık su arıtımındaki uygulamalarını arttırmıştır [15].

Dünyanın tüm yerleşim bölgelerinde, nehirlerin, göllerin ve nihayetinde okyanusların su kalitesi, yukarı havza bölgelerinde, özellikle yoğun nüfuslu alanlarda insan faaliyetlerinden üretilen atık suların nasıl işlendiğine ve bertaraf edildiğine bağlıdır. Küresel olarak üretilen evsel ve belediye atık sularının 360 km^3/yıl olduğu tahmin edilmektedir, bunun 41 km^3/yıl (%11,4) atık su arıtma tesislerinde (AAT'ler) arıtılıp yeniden kullanılır, 149 km^3/yıl (%41,4) atık su arıtma tesislerinde işlenir. 170 km^3/yıl (%47,2) atık su arıtma tesislerinde arıtılmamakta, doğrudan çevreye bırakılmaktadır [16].

Atık su arıtımı, atık suyun deşarj veya yeniden kullanıma uygun hale getirilmesi için kirleticilerin uzaklaştırıldığı bir işlemdir. Bu kirleticiler insan ve canlı organizmaların sağlığına zarar vermektedir. Atık sular, özellikle kirlilik nedeniyle ekosistemin sağlığını doğrudan etkileyen başlıca sorunlardan biridir. Bununla birlikte, doğru kullanıldığında ekosistem sağlığını ve insan refahını iyileştirmeye hizmet edebilecek gerçekten değerli kaynaklardır [17].

2021 yılında yayınlanan Birleşmiş Milletler Dünya Su Geliştirme Raporunda hedef olarak; 2030'a kadar atık su kirliliğinin azaltılması, tehlikeli kimyasalların ve malzemelerin salınımını en aza indirilmesi, arıtılmamış atık su oranının yarıya düşürülmesi, küresel olarak geri dönüşümü ve yeniden kullanımı önemli ölçüde artırarak su kalitesinin iyileştirilmesi" ifadesine yer verilmiştir [18].

Nüfus arttıkça insanların içme suyuna olan talebi de hızla artmaktadır. En önemli içme suyu kaynağı, endüstrilerden ve tarımdan kaynaklanan kirliliğin giderek daha fazla çevreye deşarj edilmesinden dolayı büyük bir sorun haline gelmiştir. Artan evsel, endüstriyel ve tarımsal su kullanımı nedeniyle su kaynakları azaldıkça, atık su arıtmanın rolü önem kazanmaktadır. Endüstriyel su arıtmanın amacı, sudaki istenmeyen yabancı maddeleri ortadan kaldırmaktır [19].

Arıtma süreçlerinin çok azı yüksek enerji girdisi gerektirir ve atık suyu arıtmak için maliyet gerektirir. Diğer bir sorun ise, atık suda bulunan pestisitler, hidrokarbonlar, boyalar, yüzey aktif maddeler, aromatik bileşikler gibi üst kirleticilerle ilgilidir. Bu, toksik bileşikleri tamamen ortadan kaldırmak için araştırmacılar, yeni ve alternatif bir yeşil teknolojisi aracılığıyla çok çeşitli kirleticilerin bozulmasına odaklanmaktadır.

Su, yaşamın kaynağıdır ve bu değerli kaynağı korumak herkesin sorumluluğundadır. Endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan atık sular, su kaynaklarımızı kirleterek büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Bu tehdidi bertaraf etmek için endüstriyel atık suların arıtılmasını ve yeniden kullanılması sağlanmalıdır.

Atık suların arıtılması ve yeniden kullanılması, sadece çevreyi korumakla kalmaz, aynı zamanda su kaynaklarımızı da korur ve uzun vadeli su yönetimini sağlar. Bu sayede su kirliliği ciddi oranda azaltılır, var olan su kaynakları korunur ve geleceği inşa etmek için sürdürülebilirliğin artmasını sağlayacaktır [20].

Organik boyaların yaklaşık %1-20'si boya içeren endüstrilerde kullanımlarından sonra çevreye salınmakta ve büyük miktarlarda suyu kirletmektedir [21]. Endüstriyel atıksulardaki boyar madde giderimi, ekolojik açıdan kritik önem taşımaktadır. Karmaşık kimyasal yapılarına ve sentetik kökenlerine rağmen, çeşitli arıtma yöntemleri ile bu tehdit bertaraf edilebilir. Bu sorunun çözümü için, endüstriyel tesislerin arıtma yatırımlarına önem vermesi ve ilgili düzenlemelerin sıkı bir şekilde uygulanması gerekmektedir.

Kongo kırmızısı (KK) gibi organik boyaların oldukça toksik, potansiyel olarak kanserojen olduğu ve kolayca biyolojik olarak parçalanmadığı iyi bilinmektedir [22]. KK'nın aşırı kullanımı çevre kirliliğine neden olmakta ve çevre koruma kurumları için zorlu bir görev haline gelmiştir [23].

Endüstriyel atıksulardaki boya maddeleri, sadece estetik bir sorun değil, aynı zamanda çevreye büyük zarar veren bir kirleticidir. Günümüzde bu renkli tehlikeyi bertaraf etmek için kullanılan fiziksel ve kimyasal yöntemlerin maliyeti oldukça yüksektir. Bu yöntemlerin dışında, adsorpsiyon [24], fotokatalitik arıtma [25], elektrokimyasal arıtma [26] ve mikrobiyal arıtma [27] gibi alternatif yöntemler de araştırılmakta ve geliştirilmektedir. Bu yöntemler, daha ekonomik ve çevre dostu çözümler sunarak boya atıklarının arındırılmasında önemli bir rol oynayabilir.

Büyük hacimli atıksulardaki boyar maddeler, çevreye ciddi zarar veren bir kirlilik sorunu oluşturmaktadır. Bu sorunun çözümü için bilim insanları, hem etkili hem de ekonomik yöntemler geliştirmeye çalışmaktadır. Ancak, mevcut yöntemlerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar arasında yüksek maliyet, karmaşık işlemler ve çevreye zarar verebilecek yan ürünler yer almaktadır.

Bu nedenle, magnezyum borat gibi yeni ve yenilikçi malzemelerin atık su arıtımında kullanılması araştırılmaya değer bir konudur. Magnezyum borat, doğal bir mineraldir ve adsorpsiyon ve katalitik ayrışma gibi çeşitli arıtma mekanizmalarında kullanılabilir. Yapılacak olan çalışma ile, biyolojik olarak parçalanması mümkün olmayan Kongo Kırmızısı boyasının, hidrotermal yöntemle sentezlenen magnezyum borat kullanılarak endüstriyel atıksulardan fotokatalitik bozunma yoluyla saflaştırılmasına dair yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Bu çözüm ile, çevreyi ve insan sağlığını korumaya ve sürdürülebilir bir geleceğe katkıda bulunmaya yardımcı olabilir.

1.2 Tezin Amacı

Ülkemizde yaygın bir şekilde bulunan bor madeninin, endüstriyel atık sularında yer alan, insan ve çevre sağlığı bakımından son derece tehlikeli olan boyar maddelerin gideriminde kullanımını içeren detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu yüzden kimyasal birçok kirleticinin atıksulardan uzaklaştırılması için literatürde birçok fotokatalist kullanılmıştır. Yapılan bu yüksek lisans tez çalışmasında, potansiyel bir fotokatalist olabileceği düşünülen magnezyum boratın, endüstriyel boyaların atıksulardan arıtılması açısından etkinliğinin incelenmesi umut verici ve yenilikçi bir bakış açısı olacaktır.

İlk aşamada magnezyum borat üretimi hidrotermal yöntem kullanılarak üretilmiştir. Hidrotermal yöntem tercih edilme sebebi reaksiyon sıcaklığının çok yüksek olmaması, uygun koşulların kolay sağlanabiliyor olması ve kristal skoru yüksek magnezyum borat eldesinin mümkün olmasıdır. Magnezyum boratı üretirken homojen yapıda bir ürün elde etmekte tez amaçlarından bir tanesidir. Bu yüzden bu çalışmada daha homojen görünümde bir magnezyum borat elde edilerek Kongo kırmızısı boyar maddesinin fotokatalitik bozunma ile magnezyum boratta ne ölçüde bozunabildiği incelenmiştir.

Elde edilecek çıktılar neticesinde, tamamen doğal bir kaynağımız olan bor madeni, endüstriyel atık sularındaki kirleticilerin gideriminde kullanılabilecek alternatif ve etkin bir fotokatalist olup olmadığı irdelenmiş olacaktır. Beklenildiği gibi Kongo Kırmızısı boyar maddesinin fotokatalitik bozunma ile magnezyum boratta yüksek oranda ve etkili bir biçimde bozunması gerçekleştiği takdirde, magnezyum boratın atık giderimi için uygun bir fotokatalist olduğu bilgisi literatüre kazandırılacak,

farklı endüstrilerin atık sularında yer alan kirleticilerin giderimi için kullanılabilme potansiyelinin araştırılmasının da önü açılmış olacaktır. Magnezyum boratın üretimi ve atık su arıtımında kullanımı, Türkiye'yi bu alanda öncü bir ülke haline getirebilir. Bu sayede, magnezyum borat ihracatı yeni bir gelir kaynağı oluşturabilir ve ülke ekonomisine katkıda bulunabilir. Magnezyum boratın atık su arıtımında kullanılmasının teşvik edilmesi, endüstriyel tesislerin de çevreye duyarlı yatırımlar yapmasını sağlayabilir. Bu durum, Türkiye'nin genel çevresel performansını da iyileştirebilir. Sonuç olarak, Magnezyum boratın atık su arıtımında kullanılması, sadece çevreyi korumaya değil, aynı zamanda Türkiye ekonomisine ve stratejik konumuna da önemli katkılar sağlayabilir. Bu nedenle, bu alandaki çalışmaların desteklenmesi ve teşvik edilmesi gerekmektedir.

1.3 Hipotez

Yapılan çalışmada, hidrotermal yöntem ile üretilen magnezyum boratların, endüstrilerin faaliyetleri sonucu oluşan atıksular içerisinde yer alan, çevreye deşarj edilen Kongo Kırmızısı boyar maddesinin atıksudan arıtımı hedeflenmektedir. Magnezyum boratı üretirken homojen yapıda bir ürün elde etmekte tez amaçlarından bir tanesidir. Bu yüzden bu çalışmada kapayıcı ajanlar eklenerek daha homojen görünümde bir magnezyum borat elde edilerek boyar maddenin magnezyum boratta ne ölçüde bozunabildiği incelenmiştir.

Boyar madde içeren atık suların alıcı ortama direk verilmesi, yalnızca görsel kirlilik gibi estetik problemleri değil, aynı zamanda kontrolsüz anaerobik şartlarda toksik ve kanserojen aromatik aminlerin oluşumu gibi ciddi bir çevresel tehdit oluşturmaktadır [28].

Bu çalışmada ile bir azo boyası olan Kongo Kırmızısı'nın (KK) sulu örneklerden uzaklaştırılmasında biyouyumluluğu, maliyeti ve güçlü yapısı magnezyum borat fotokatalistinin kullanılması amaçlanmıştır. Mevcut literatürde magnezyum boratların endüstriyel boyaların atık sulardan arıtılmasındaki etkinliğini inceleyen detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Magnezyum borat fotokatalistinin, Box-Behnken tasarımı kullanılarak hazırlanan farklı konsantrasyonlardaki sulu çözeltilerden Kongo Kırmızısı boyasının fotokatalitik bozunmasını etkilemesi umut verici ve yenilikçi bir yaklaşımdır.

2
BOR

2.1 Bor Elementi

1808 yılında bor elementi Fransız Kimyager Gay-Lussac ile Baron Louis Thenard ve bağımsız olarak İngiliz kimyager Sir Humpry Davy tarafından bulunmuştur.

Amorf bor, koyu kahverengi bir toz halindedir. Bu toz, oldukça gevrektir ve kolayca kırılır. Bu özelliği, onu zımpara kağıdı gibi aşındırıcı malzemelerde kullanılmaya uygun hale getirir. Koyu kahverengi rengi, bor atomlarının rastgele dizilişinden kaynaklanır. Bu rastgele dizilim, ışığın farklı dalga boylarını emmesine ve yansıtmasına neden olur, bu da toza koyu kahverengi rengini verir. Kristal halinde ise monoklinik kristal formundaki bor ise sarımsı kahverengi bir renktedir. Bu kristaller, oldukça sert ve dayanıklıdır. Sarımsı kahverengi rengi, bor atomlarının düzenli bir şekilde dizilişinden kaynaklanır. Bu düzenli dizilim, ışığın belirli dalga boylarını emmesine ve yansıtmasına neden olur, bu da kristallere sarımsı kahverengi rengini verir [29].

Periyodik tablonun üçüncü grubunda bulunan bor (B) elementi doğada %18,83 oranında B-10 ve %81,17 oranında B-11 olmak üzere iki farklı kütle numarasına sahip kararlı izotopu bulunmaktadır [30]. Farklı kütleli izotopları, metal ve ametal arasında bir köprü görevi gören yarı iletken yapısı, sonsuz bileşik çeşitliliği ve nötronları emme özelliği sayesinde bor, modern dünyanın birçok önemli teknolojisinin temelini oluşturur [31].

Bor elementi, doğanın sunduğu en şaşırtıcı elementlerden biridir. Farklı elementlerle etkileşime girerek yepyeni özellikler kazanan bor, birçok farklı alanda kullanılan önemli bir hammaddedir.

Genellikle yeryüzünde topraklarda, kayalarda, yüzey ve okyanus sularında borik asit ve inorganik boratlar şeklinde bulunur [32].

Bor elementi, farklı formlarda farklı kimyasal davranış sergilemektedir. Mikrometre boyutunun altındaki amorf bor, oldukça reaktiftir ve kolayca reaksiyona girerken, kristal formundaki bor ise dirençlidir ve tepkimelere karşı daha az isteklidir. Yüksek sıcaklıklarda su ile reaksiyonu sonucu borik asit ve yan ürünler meydana gelir. Mineral asitler ile etkileşimi, sıcaklık ve konsantrasyon gibi değişkenlere bağlı olarak yavaş veya oldukça hızlı (hatta patlayıcı) olabilir; bu reaksiyonun temel ürünü borik asittir [33].

Bor elementi, yüksek erime noktası ile müthiş bir direnç gösterir, düşük yoğunluğu ise onu hafif ve kullanışlı kılmaktadır. Bor, suda çözünmez ve allotrop oluşturma özelliğine sahiptir. Bu sayede farklı formlarda bulunabilir. Bir formu berrak kırmızı kristallerden oluşurken, diğer formu ise metalik görünümlü siyah kristallerden oluşur. Borun bu farklı formları, ona farklı kimyasal ve fiziksel özellikler kazandırır ve onu birçok farklı alanda kullanılmaya uygun hale getirir.

Borun kimyasal özelliklerine bakıldığında, genellikle asitlerle reaksiyon vermez. Toz ve amorf şeklinde ise nitrik asit veya sülfürik asit ile reaksiyona girer. Saf bor, bor hidritlerin ve halojenürlerin piroliziyle veya bor klorür veya bromürün hidrojenle indirgenmesiyle elde edilebilir. Bor, hidroklorik asit veya hidroflorik asitin kaynatılmasından etkilenmeyen kristal formunda inerttir. İnce toz haline getirilmiş bor, sıcak konsantre nitrik asit ile yavaşça oksitlenir. Bor elementine ait fiziksel özellikler Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Bor elementinin fiziksel özellikleri [33]

Fiziksel Özellikler	
Atom ağırlığı (g/mol)	10.81 ±0.005
Kaynama Noktası (K-°C- °F)	4.275–4.002– 7.236
Ergime Noktası (°C)	2300
Buharlaşma Isısı kJ/mol	489,7
Yoğunluk (g/cc-K)	2,34-300
Sertlik (mohs)	9,3
Görünüş	Kahverengi ametal kristal, sarı
Elastik Modül (GPa)	320
Füzyon Entalpisi (kJ/mol)	22,18
Atomizasyon Entalpisi (GPax°C)	573,2x25
Buharlaşma Entalpisi (kJ/mol)	480

Boraks, su ve gliserolde yüksek çözünürlüğe sahipken, alkolde çok az çözünür ve asitlerde çözünmez. Bu durum, boraks molekülünün farklı çözücülerle olan kimyasal etkileşimlerinden kaynaklanır. Su ve gliserol gibi polar moleküller, boraks ile hidrojen bağı kurarak çözünürlüğü artırır. Alkol ise boraks ile daha zayıf Van der Waals kuvvetleri oluşturur ve bu da düşük çözünürlüğe yol açar. Asitler ise boraksın hidrolizini sağlayarak çözünmez borik asit ve sodyum iyonları oluşturur [34].

Bor oksit (B_2O_3), soğuk suda az çözünürken, sıcak suda daha fazla çözünürlük gösterir. İnce öğütülmüş bor oksit, su ile şiddetli bir reaksiyona girerek borik asit (H_3BO_3) oluşturur. Bu reaksiyon, bor oksitin yüksek reaktifliği ve su moleküllerinin hidrojen iyonlarını (H^+) ve hidroksit iyonlarını (OH^-) serbest bırakma yeteneği ile açıklanmaktadır. Amorf formdaki bor oksit ise suyun yanı sıra alkol, gliserol ve asitlerde de çözünürlük gösterir. Bor oksit, borik asidin eritilmesi ve ardından suyun buharlaştırılması yoluyla elde edilebilir. Bu işlem, bor oksitin borik asit ile kimyasal denge oluşturmasını ve borik asitin sudan daha düşük bir kaynama noktasına sahip olmasını sağlar.

2.2 Bor Mineralleri

Bor tuzlarının kullanımı, insanlık tarihi kadar eskidir. Arkeolojik bulgular, bor tuzlarının ilk kez 4 bin yıl önce Tibet'te kullanıldığını göstermektedir. Babiller, bor tuzlarını değerli eşyaları eritmek için kullanırken, Mısırlılar mumyalama işleminde bu tuzlardan faydalanmıştır. Eski Yunan ve Romalılar ise bor tuzlarını zeminlere serpiştirerek arena temizliği için kullanmıştır.

Bor tuzlarının tıbbi kullanımı, 875 yılına kadar uzanır. Araplar, bu tuzlarla hazırladıkları ilaçlarla çeşitli hastalıkları tedavi etmeye çalışmışlardır.

Marco Polo'nun 13. yüzyılda bor minerallerini Avrupa'ya getirmesi, modern bor endüstrisinin doğuşunu tetikleyen önemli bir olaydır. 1771 yılında yapılan keşifle, İtalya'nın Toskana bölgesindeki sıcak su kaynaklarında Sassolit minerali varlığı ortaya çıkarıldı. Bu keşif, bor tuzlarının üretimine yeni bir boyut kazandırmıştır. 1830 yılı, bor endüstrisinin gelişiminde önemli bir dönüm noktasıdır. Bu yılda, İtalya'da borik asit üretimi sistematik hale gelirken, Şili'de ise endüstriyel boraks madenciliği faaliyetlerine başlanmıştır [35].

19. yüzyılın sonlarında ABD'de Nevada, California, Calico Mountain ve Kramer bölgelerinde bor yatakları keşfedilmiş ve bu yataklar işletilmeye alınmıştır. Bu keşifler ile birlikte ABD, bor üretiminde dünya lideri haline gelmiştir.

Türkiye'de bor madenciliğinin tarihi, oldukça eskilere dayanmaktadır. Doğu Roma İmparatorluğu döneminden beri bor minerallerinin varlığı bilinmektedir. Kullanılmakta olduğu da tahmin edilmektedir. İlk bor minerali yatakları ise Balıkesir'in Susurluk ilçesinde keşfedilmiştir. Bu bölgedeki cevher, kalsiyum tuzu olan Pandermit' ten oluşmaktadır. İşletmesi, uzun yıllar yabancı şirketler tarafından gerçekleştirilmiştir.

1861 yılında çıkartılan "Maadin Nizamnamesi", Türkiye'de bor madenciliğinin resmi olarak başlangıcını temsil eder. Bu nizamname uyarınca, Fransız şirketine 20 yıllık işletilmesi için imtiyaz verilmiştir. Bu ilk işletmenin ardından, Türkiye'de bor madenciliği hızla gelişmeye başlamıştır [36].

20. yüzyılda ise bor madenciliği, Türkiye ekonomisi için önemli bir rol oynamaya başlamıştır. 1938 yılında Etibank'ın kurulmasıyla birlikte, bor madenlerinin işletilmesi ve pazarlanması millileştirilmiştir. Etibank, günümüzde de Türkiye'nin en önemli bor üreticisi ve ihracatçısı konumundadır.

Türkiye, dünya bor rezervlerinin %70' ine sahip olarak bu alanda lider konumdadır. Ülkemizde bor yatakları Eskişehir, Kütahya, Balıkesir ve Bursa illerinde bulunmaktadır. Bu yataklardan çıkarılan bor mineralleri, borik asit, boraks, sodaboraks ve kolemanit gibi çeşitli ürünlere işlenmektedir.

Bor ve bor ürünleri, birçok farklı sektörde kullanılmaktadır. Cam, seramik, ilaç, kozmetik, nükleer ve uzay sanayii gibi sektörlerde bor ve bor ürünlerine büyük talep bulunmaktadır. Türkiye'de bor madenciliği ve bor ürünlerinin üretilmesi ve işlenmesi, ülke ekonomisine önemli katkılar sağlamaktadır.

Bor mineralleri, bor oksit içeren doğal bileşikler olup, bu mineraller, yerkabuğunda yaygın bulunur. Jeolojik süreçler sonucu oluşurlar. Bor minerallerinin yapısı, içerdikleri bor oksit oranına ve diğer elementlerin varlığına bağlı olarak değişir.

Bilim insanları, bugüne kadar doğada 230'dan fazla farklı bor minerali tanımlamıştır. Bu mineraller, çeşitli renklerde, şekillerde ve boyutlarda bulunabilir. En yaygın bor mineralleri arasında tinkal (boraks), kolemanit, üleksit, borasit, pandermit ve kernit yer alır. Doğada yaygın olarak bulunan bor mineralleri arasında

%10'a kadar bor içerebilen turmalin de yer alır. Fakat endüstride daha çok tinkal, kernit, kolemanit ve üleksit gibi alkali ve toprak alkali bor mineralleri kullanılır. Bu minerallerin ticari yatakları sınırlıdır ve en fazla Türkiye ve ABD'de bulunur. Ülkemizde yaygın olarak bulunan bor mineralleri kolemanit, tinkal ve üleksittir. Kolemanit dünya rezervlerinin büyük kısmı da Türkiye'dedir. Başlıca bor mineralleri Tablo 2.2' de verilmiştir.

Tablo 2.2 Ticari öneme sahip başlıca bor mineralleri [1]

Tip	Mineral	Bileşim	%B_2O_3
Hidrojen Boratlar	Sassolit	H_3BO_3	56,3
Sodyum Boratlar	Kernit(Rasorit)	$Na_2B_4O_7.4H_2O$	51,0
	Tinkal (Borax)	$Na_2B_4O_7.10H_2O$	36,5
	Tinkalkonit	$Na_2B_4O_7.5H_2O$	48,8
Sodyum-Kalsiyum Boratlar	Üleksit (Boronatrokalsit)	$NaCaB_5O_9.8H_2O$	43,0
	Probertit(Kramerit)	$NaCaB_3O_9.5H_2O$	49,6
Kalsiyum Boratlar	İnyoit	$Ca_2B_6O_{11}.13H_2O$	37,6
	Kolemanit	$Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$	50,8
	Meyerhofferit	$Ca_2B_6O_{11}.7H_2O$	46,7
	Nobleit	$CaB_6O_{10}.4H_2O$	62,0
	Pandermit(Priseit)	$CaB_{10}O_{19}.7H_2O$	49,8
Kalsiyum Borosilikatlar	Datolit	$CaBSiO_4OH$	24,9
	Danburit	$CaB_2Si_2O_8$	28,3
	Havlit	$Ca_4Si_2B_{10}O_{23}.5H_20$	44,5
Magnezyum Boratlar	Aşarit(Szaybelit)	$MgBO_2OH$	41,4
	Borasit	$Mg_3B_7O_{13}Cl$	62,2
	İnderborit	$CaMgB_6O_{11}.11H_2O$	41,5
	İnderit	$MgB_3O_3(OH)_5•5(H_2O)$	37,3
	Hidroborasit	$CaMgB_6O_{11}.6H_2O$	50,5
	Kotoit	$Mg_3B_2O_6$	36,5
	Kurnakovit	$Mg_2B_6O_{11}.15H_2O$	37,3
	Suanit	$Mg_2B_2O_5$	46,3
	Pinnoit	$MgB_2O_4.3H_2O$	42,5
Diğer Boratlar	Bakerit	$Ca_4B_4(BO_4)(SiO_4)3(OH)3•(H_2O)$	27,9
	Kahnit	$CaAsBO_6.2H_2O$	11,7
	Ludvigit	$(Fe,Mg)_4Fe_2B_2O_7$	17,8
	Searlesit	$NaBSi_2O_5(OH)_2$	17
	Teepleit	$Na_2B(OH)_4Cl$	21,7
	Tunelit	$SrB_6O_{10}.4H_2O$	52,9
	Vonsenit	$(Fe,Mg)_2FeBO_5$	10,3

Bor mineralleri, madencilik yöntemleri ile çıkarılarak işlenir ve zenginleştirilir. Ardından rafine edilerek cam, seramik, tarım, deterjan ve temizlik gibi birçok sektörde kullanılan yüksek verimli, karlı ve sürdürülebilir bor ürünlerine dönüştürülür.

2.2.1 Hidrojen Boratlar

Ortoborik asit veya hidrojen borat kimyasal formülüne sahip zayıf bir asit olan borik asit, antiseptikler, böcek öldürücüler, alev geciktiriciler ve nötron emiciler gibi geniş bir yelpazede uygulama alanı bulur. Ayrıca diğer kimyasal bileşiklerin sentezinde öncü görevi görür. Kimyasal formülü H_3BO_3 olan borik asit, renksiz kristaller veya suda çözünen beyaz toz halinde bulunur. Doğada sassolit (Şekil 2.1) adıyla bilinen bir mineral olarak da bulunabilir. İlk defa Wilhelm Homberg tarafından denklem (2.1)'de verildiği gibi sülfürik asidin yan ürünü olarak bulunmuştur [1].

$$Na_2B_4O_7.10H_2O + 2HCl \rightarrow 4H_3BO_3 + 5H_2O + 2NaCl \quad (2.1)$$

Türkiye'de ise, (2.2) denklemi ile kolemanitin ($Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$) sülfürik asit (H_2SO_4) ile reaksiyonu sonucunda üretilmektedir. Tepkime sonucu borik asit (H_3BO_3) ve jips ($CaSO_4.2H_2O$) oluşmaktadır. Jips kristalleri çökeltme yoluyla oluşur ve borik asit kristalleştirme yoluyla üretilir. Bu heterojen (katı-sıvı) reaksiyon aşağıda gösterildiği gibi ilerler.

$$Ca_2B_6O_{11}.5H_2O + 2H_2SO_4 + 6H_2O \rightarrow 2CaSO_4.\ 2H_2O + 6H_3BO_3 \quad (2.2)$$



Şekil 2.1 Sassolit [37]

Haşere kontrolünde böcek ilacı, lehimlemede lehim pastası, yangın geciktirici ve hava koşullarına dayanıklı kaplama olarak kullanılan boraks, boyalarda, nikel banyolarında, film geliştiricilerde, cam, emaye, sabun, boya, kağıt, yapıştırıcı ve çelik gibi ürünlerde de katkı maddesi olarak kullanılmaktadır [38].

Borosilikat cam ve cam elyaflarının üretiminde akışkanlaştırıcı (fluks) ve katkı maddesi olarak kullanılır. Bu sayede camın erime noktası düşürülür ve üretim süreci kolaylaştırılır. Tekstil ve izolasyon ürünlerinde alev geciktirici olarak kullanılır. Bu sayede tekstil ürünlerinin yanma riskini azaltır ve binalarda kullanılan

izolasyon malzemelerinin daha güvenli hale gelmesini sağlar [39]. Borik asitin özellikleri Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.1 Borik asit fiziksel özellikleri [37]

Fiziksel Özellikler	
Özgül ağırlık (g/cm^3) (^{o}C)	1,51-(20)
Dökme (yığın) yoğunluğu (g/cm^3)	0,892
Molekül ağırlığı (g/mol)	61,83
Erime noktası (^{o}C)	450
Kaynama noktası (^{o}C)	1860
Isı kapasitesi (J/g^{o}C)	24,7
Isıl iletkenlik (W/Mk)	0,407

2.2.2 Sodyum Boratlar

Bor mineralleri, doğada çeşitli formlarda bulunur. Bu formlar arasında boraks ve tinkalkonit**,** sodyum boratların en yaygın örnekleridir.

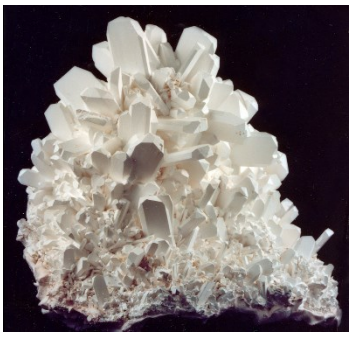
Tinkal, $Na_2B_4O_7.10H_2O$ kimyasal formülüne sahip olup %36.5 B_2O_3 içermektedir. Boraks, saf haliyle renksiz ve saydam olsa da, içerdiği diğer elementlere bağlı olarak pembe, sarımsı veya gri tonlarında da bulunabilir. *Tinkalkonit* farklı olarak, borakstan daha az su içerir. Kimyasal formülü $Na_2O.2B_2O_3.5H_2O$ olup, içerisinde %48.8 oranında bor oksit mevcuttur [40].

Tinkalkonit, doğada saydam ve uzunlamasına iğne şeklinde küme kristaller halinde bulunur. Soğuk suda az miktarda çözünürlüğü ile de diğer minerallerden ayrılır [40].

Kernit (Rasorit) ismiyle de bilinen $Na_2B_4O_7.4H_2O$ formüllü bir diğer bor minerali de bu ailenin bir üyesidir

Kernit ($Na_2B_4O_7.4H_2O$), monoklinal bir kafes yapısına sahip bir bor mineralleridir. Fakat kristalleri, genellikle yarılma sonucu oluşan kırıklar ile kaplıdır. Bu mineralin iki yönde mükemmel yarılma özelliği bulunur. Dağınık ve kıymık lifler halinde bulunan tinkalkonit, kolayca ezilebilen bir yapıya sahiptir [41].

Boraks, Tinkalkonit ve Kernit mineralleri Şekil 2.2'de, boraks mineralinin fiziksel özellikleri Tablo 2.4'te verilmiştir.


a) Boraks **b)** Tinkalkonit **c)** Kernit

Şekil 2.1 Boraks, Tinkalkonit, Kernit [42-44]

Tablo 2.2 Boraks fiziksel özellikleri [1]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$Na_2B_4O_7.\ 10H_2O$
Kristal Sistemi	Monoklinik
Kristal Biçimi	kısa prizmalar veya beyaz levhalar şeklinde
Sertlik (Mohs)	2-2.5
Özgül Ağırlık (g/cm³)	1.715
Dizinim	{100} mükemmel
Renk ve Şeffaflık	Renksiz; beyaz, grimsi, yeşilimsi, mavimsi; şeffaf yarışeffaf
Parlaklık	Camsı
B_2O_3 içeriği (%)	36.6

2.2.3 Sodyum Kalsiyum Boratlar

Sedimanter kayaçlar içerisinde, boraks yataklarının önemli bir bileşeni olan üleksit, kolemanit minerali ile sıklıkla birlikte bulunur. Bu mineraller, evaporit oluşumunun ürünü olarak ortaya çıkmaktadır.

Türkiye'nin bor hazinesi olarak bilinen Emet'te, üleksit minerali üç farklı jeolojik katmanda yer almaktadır. Bu katmanlarda kolemanit ve hidroborasit mineralleri ile birlikte bulunur. Eskişehir'in Kırka ilçesinde ise borat yatakları içerisinde boraks, kolemanit ve inyonit mineralleri ile birlikte üleksitite rastlanır. Dünyada üleksit minerali, Türkiye'nin dışında sadece Arjantin'de bulunmaktadır.

Üleksit ($NaCaB_5O_9.8H_2O$), içeriğinde yüksek miktarda sodyum ve kalsiyum barındıran bir bor mineralidir. Üleksit (Şekil 2.3), soğuk suda çözünürlüğü oldukça

düşük bir mineraldir [45]. Fakat sıcak su ve asit ortamında yüksek çözünürlük gösterir. Bu özelliği, onu bor camı üretiminde ve seramik endüstrisinde ısı direncini ve aşınmaya karşı dayanıklılığı arttırmak için ideal bir malzeme haline getirir. Ayrıca üleksit, sertliği arttırıcı bir etkiye de sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı fren balatalarının formülasyonunda da kullanılmaktadır [46]. Üleksit özellikleri Tablo 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.2 Üleksit [47]

Tablo 2.3 Üleksit fiziksel özellikleri [48]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$NaCaB_5O_9.8H_2O$
Kristal Sistemi	Triklinik
Kristal Biçimi	Genellikle iğnemsi kristalli; merceksi ya da nodüler, ışınsal, pamuk yumağı şekilli
Sertlik (Mohs)	2.5
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	1.955
Dilinim	{010} mükemmel, {1-10} iyi
Renk ve Şeffaflık	Beyaz, renksiz, ipeksi; şeffaf
Parlaklık	Camsı

Probertit (Şekil 2.4), kirli beyazdan açık sarımsı renklere sahip, ışınsal ve lifsi yapıda kristallerden oluşan bir bor mineralidir. Bu kristaller 5 mm-5 cm aralığında boyutlara ulaşabilir. Probertit'in kimyasal bileşiminde %49,6 oranında bor oksit bulunur. Kestelek yataklarında ikincil mineral olarak yer alır [49].

Probertit özellikleri Tablo 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.3 Probertit [50]

Tablo 2.4 Probertit fiziksel özellikleri [51]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$NaCaB_5O_9.5H_2O$
Kristal Sistemi	Monoklinik
Kristal Biçimi	Işınsal ve lifsi şekilli kristaller
Sertlik (Mohs)	3.5
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	2.132
Dilinim	{110} mükemmel
Renk ve Şeffaflık	Kirli beyaz, açık sarımsı renk, Şeffaf, Yarı Saydam
Dayanıklılık	Kırılgan

2.2.4 Kalsiyum Boratlar

Boratlar, doğanın sunduğu en özel minerallerden biridir. Farklı elementlerle kolayca bileşik oluşturabilmeleri, onları birçok sektörde vazgeçilmez bir unsur haline getirir. Bu bileşiklerden bazıları, cam, porselen ve seramik endüstrisinde malzemelerin dayanıklılığını ve işlenebilirliğini artırmak için kullanılır. Bununla birlikte, boratlar sadece inşaat malzemeleriyle sınırlı değildir. Alev geciktirici katkı maddeleri üretiminde de önemli rol oynarlar. Bor bileşikleri, yanma reaksiyonunu yavaşlatarak yangınların yayılmasını önler ve can ve mal güvenliğini korur [52].

Kolemanit adı verilen bu hekzaborat türü, alev geciktirici katkı olarak en çok tercih edilen kalsiyum borat türüdür. Kolemanitin yanı sıra, düşük dehidratasyon sıcaklığına sahip diğer kalsiyum boratlar da alev geciktirici özellikleri ile öne çıkar. Bu özellikler sayesinde, bu mineraller birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Nobleit ise bilinen bir diğer kalsiyum borat türüdür [53, 54].

Kolemanit (Şekil 2.5), Türkiye ve ABD'de bulunan, birçok sektörde yaygın olarak kullanılan ve önemli faydaları olan değerli bir mineraldir. Yaygın kullanım alanları ve farklı sektörlere sağladığı faydalar ile öne çıkan bir mineraldir. Alev geciktirici özelliğinin yanı sıra, cam ve seramiklerin dayanıklılığını artırma, metalurji ve cam elyafı üretimini kolaylaştırma, gübre ve deterjanlarda etkinlik sağlama ve kozmetik ürünlerde cilt bakımı sunma gibi birçok fayda sunmaktadır. Bor açısından zenginliği**,** kurak iklim bölgelerinde oluşması**,** saf haliyle suda yavaş çözünürken HCl'de hızlı çözünmesi **ve** çeşitli kullanım alanları ile öne çıkan değerli bir mineraldir [55]. Kolemanit karakteristik özellikleri Tablo 2.7‘ de verilmiştir.



Şekil 2.4 Kolemanit [56]

Tablo 2.5 Kolemanit fiziksel özellikleri [57]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$2CaO.3B_2O_3.5H_2O$
Kristal Sistemi	Monoklinik
Kristal Biçimi	kısa ve eşit boyutlu prizmalar şeklinde kristaller
Sertlik (Mohs)	4-4.5
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	2.42
Dilinim	{010} mükemmel
Renk ve Şeffaflık	Renksiz, beyaz; şeffaf-yarı şeffaf
Parlaklık	Camsı
Ayırıcı özellik	Özel kristal formu, kusursuz dilinimi ve diğer boratlara kıyasla daha yüksek sertliği

Pandermit (Şekil 2.6), Aragonit ile birlikte, sıcak su kaynaklarının çevresinde oluşan, beyaz renkli, kil ve jips ile birlikte bulunan ve bor açısından zengin bir mineraldir. Sultançayırı ve Bigadiç'te bulunan Pandermit yatakları, bu değerli mineralin çıkarılması için önemli bir kaynak oluşturmaktadır [46]. İçeriğindeki bor oksit miktarı %49.8 olup karakteristik özellikleri Tablo 2.8’de verilmektedir.



Şekil 2.5 Pandermit [58]

Tablo 2.6 Pandermit fiziksel özellikleri [59]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$Ca_4B_{10}O_{19}.\ 7H_2O$
Kristal Sistemi	Triklinik
Kristal Biçimi	Nodüller veya düzensiz kütleler halinde, yumuşaktan serte değişen tebesirimsi bir dokuya sahip ve kompakt bir mineral
Sertlik (Mohs)	3-3.5
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	2.42
Dilinim	{001} mükemmel
Renk ve Şeffaflık	Beyaz
Parlaklık	Toprağımsı
Ayırıcı özellik	Şekli, mükemmel dilinimi

Nobleite($CaB_6O_{10}.4H_2O$), Death Valley'de keşfedilmiş yeni bir sulu kalsiyum borat mineralidir. Nadir bulunan bir borat minerali olan Nobleite (Şekil 2.7), bor açısından zengin olması ve çeşitli alanlarda kullanılabiliyor olması açısından önemlidir [60].Şili ve Arjantin'de bulunan mineralin özellikleri Tablo 2.9' da verilmiştir.



Şekil 2.6 Nobleit [61]

Tablo 2.7 Nobleit fiziksel özellikleri [62]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$CaB_6O_{10}.4H_2O$
Kristal Sistemi	Monoklinik
Sertlik (Mohs)	3
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	2.09
Dilinim	{100} mükemmel
Renk ve Şeffaflık	Renksiz Beyaz, şeffaf

İnyoit (Şekil 2.8) çok ender lokal oluşumlar halinde bulunmaktadır. Adını 1914 yılında keşfedildiği Kaliforniya, Inyo County'den alan Inyoit, renksiz bir monoklinik mineral olup fiziksel özellikleri Tablo 2.10' da verilmiştir. Susuz kaldığında beyaza döner [63].



Şekil 2.7 İnyoit [64]

Tablo 2.8 İnyoit fiziksel özellikleri [65]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$Ca_2B_6O_{11}.\ 13H_2O$
Kristal Sistemi	Monoklinik
Sertlik (Mohs)	2
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	1.87
Dilinim	{001}iyi
Renk ve Şeffaflık	Renksizdir, kısmi dehidrasyonla beyaza döner;Şeffaftan Yarı Saydam'a
Parlaklık	Camsı

Meyerhofferit (Şekil 2.9), gri renkli nodüller halinde bulunan ve kolemanit, inyoit ve üleksit gibi diğer minerallerle birlikte bulunan bir bor mineralidir. Meyerhofferit, bor açısından zengin olması ve jeolojik araştırmalarda kullanılabilmesi açısından önemli olup fiziksel özellikleri Tablo 2.11'de verilmektedir. İnyoitin dehidrasyonu

ile ya da eriyik kasiyum boratları sonucu Türkiye'deki yataklarda bulunmaktadır. Alman kimyager Wilhelm Myerhoffer'dan (1864-1906) adını almıştır [66].



Şekil 2.8 Meyerhofferit [67]

Tablo 2.9 Meyerhofferit fiziksel özellikleri [66]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$Ca_2B_6O_{11}.7H_2O$
Kristal Sistemi	Triklinik
Yoğunluk (g/cm³)	2.13
Renk ve Şeffaflık	Renksiz, beyaz Şeffaftan Yarı Saydam'a
Parlaklık	Camsı, ipeksi

2.2.5 Kalsiyum Borasilikatlar

Kalsiyum borosilikat bor mineralleri, bor oksit, kalsiyum oksit ve silikon dioksit gibi oksitlerden oluşan bir mineral grubudur. Bu mineraller genellikle pegmatit ve skarn gibi jeolojik oluşumlarda bulunur. Kalsiyum borosilikat bor minerallerinin bazı yaygın örnekleri şunlardır: *Datolit*, kalsiyum borositrat minerali olarak bilinen beyaz veya renksiz bir mineraldir. Genellikle pegmatit ve skarn gibi jeolojik oluşumlarda bulunur. Datolit (Şekil 2.10), mücevher yapımında ve bazı seramiklerin üretiminde kullanılır [68].



Şekil 2.9 Datolit [69]

Datolit fiziksel özellikleri Tablo 2.12'de verilmiştir.

Tablo 2.10 Datolit fiziksel özellikleri [69]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$CaBSiO_4OH$
Kristal Sistemi	Monoklinik
Sertlik (mohs)	5.5
Yoğunluk (g/cm^3)	2.9
Renk ve Şeffaflık	Kahverengi, Renksiz, Sarı, Beyaz, Açık yeşil. Şefaf ile yarı saydam
Parlaklık	Camsı

Danburit (Şekil 2.11), ilk olarak 1839 yılında Amerikalı kimyacı Charles Upham Shephard tarafından Connecticut, Danbury'de keşfedilmiştir. Adını da bu keşif yerine borçludur. Danburit nadir bulunan bir mineraldir ve esas olarak Meksika, Myanmar, Madagaskar, Japonya, Rusya ve İsviçre'de çıkarılmaktadır. Mücevherat sektöründe kesilmiş taş olarak kullanılmasının yanı sıra, yüksek netliği ve optik özellikleri nedeniyle bazı bilimsel uygulamalarda da değerlendirilmektedir [70].



Şekil 2.10 Danburit [71]

Danburit fiziksel özellikleri Tablo 2.13'te verilmiştir.

Tablo 2.11 Danburit fiziksel özellikleri [71]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$CaB_2Si_2O_8$
Kristal Sistemi	Ortorombik
Sertlik (mohs)	7
Yoğunluk (g/cm^3)	2.99
Renk ve Şeffaflık	Renksiz, Beyaz, Gri, Kahverengimsi Saman sarısı. Şeffaf ile yarı saydam
Parlaklık	Yağlı

Havlit (Şekil 2.12), evaporit yataklarında bulunmaktadır. genellikle küçük oymalar veya mücevher bileşenleri gibi dekoratif objeler yapmak için kullanılır. Kristalleri nadirdir ve dünya çapında yalnızca birkaç yerde bulunmuştur [72].



Şekil 2.11 Havlit [73]

Havlit fiziksel özellikleri Tablo 2.13'te verilmiştir.

Tablo 2.12 Havlit fiziksel özellikleri [73]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$Ca_4Si_2B_{10}O_{23}.5H_20$
Kristal Sistemi	Monoklinik
Sertlik (mohs)	2.5-3.5
Yoğunluk (g/cm^3)	2.58
Renk ve Şeffaflık	Renksiz, Beyaz, yarı saydam
Parlaklık	Donuk

2.2.6 Magnezyum Boratlar

Magnezyum borat, doğada kendiliğinden oluşabilen veya laboratuvarda sentezlenebilen bir mineraldir. Bu mineraller, magnezyum ve bor elementlerinin farklı oranlarda birleşmesiyle oluşur. Hem doğal hem de sentetik magnezyum boratlarda, 2:1, 1:1, 1:2, 2:3, 1:3 ve 3:5 (Mg:B) gibi çeşitli oranlar gözlemlenir [74].

Magnezyum boratlar, çeşitli ve şaşırtıcı özelliklere sahip bir mineral grubudur. Bu minerallerin keşfi ve kullanımı, birçok farklı alanda yeniliklere ve gelişmelere yol açmıştır. Bilim insanları ve mühendisler, magnezyum boratların potansiyelini keşfetmeye ve yeni uygulamalar geliştirmeye devam etmektedir.

Başlıca Kullanım Alanları:

- **Seramik Endüstrisi:** Magnezyum borat, seramiklerin daha sağlam ve dayanıklı olmasını sağlayarak binalarda, mutfaklarda ve diğer alanlarda uzun ömürlü kullanım imkanı sunar.
- **Deterjan Bileşimleri:** Kirleri kolayca temizleyen ve parlaklık kazandıran deterjanlarda magnezyum borat kullanımı yaygındır.
- **Süper İletken Malzemeler:** Magnezyum borat, elektrik direnci sıfıra yakın olan süper iletken malzemelerin üretiminde önemli rol oynar. Bu malzemeler, tıp, enerji ve ulaştırma gibi alanlarda devrim yaratabilir.
- **Hidrokarbon Katalizörler:** Kimyasal reaksiyonları hızlandıran katalizörlerde magnezyum borat kullanımı, petrol ve doğalgaz gibi hidrokarbonların işlenmesini kolaylaştırır.
- **Sürtünmeyi Azaltıcı Katkı ve Yağlar:** Makinelerin daha sessiz ve uzun ömürlü çalışmasını sağlayan sürtünmeyi azaltıcı katkı ve yağlarda magnezyum borat kullanılır.
- **Nötron ve Gama Radyasyona Karşı Koruma:** Yüksek bor içeriği sayesinde magnezyum borat, nükleer tesislerde radyasyondan korunmada kullanılan malzemelerin üretiminde kullanılır.
- **Süper iletken magnezyum diborür:** Magnezyum borat, yüksek iletkenliği ile dikkat çeken magnezyum diborürün üretiminde kullanılır.
- **Metal Yüzey Kaplama:** Metal yüzeylerin yalıtımı ve korunması için magnezyum borat içeren kaplama bileşikleri kullanılır.
- **Isıya Duyarlı Mürekkep:** Isıya göre renk değiştiren özel mürekkeplerin üretiminde magnezyum borat kullanılır.
- **Boya Katkıları:** Boyaların korozyona karşı direncini artırmak için magnezyum borat kullanılır.
- **Kontakt Lens Yıkama Suları:** Kontakt lenslerin hijyenini korumak için magnezyum borat içeren yıkama suları kullanılır.
- **Alev Geciktiriciler:** Yangın riskini azaltmak için magnezyum borat içeren alev geciktirici malzemeler kullanılır [75].

Ülkemizde en çok bulunan magnezyum borat türleri ise *İnderit* ($2MgO._3(B_2O_3).15H_2O$) ve *Kurnakovit*'tir ($Mg_2B_6O_{11}.15H_2O$).

2.2.7 Diğer Boratlar

Birçok bor minerali çeşidi mevcuttur. Diğer boratlar arasında en önemlilerinden biri tünelit (Şekil 2.13) mineralidir. *Tünelit* ($SrB_6O_{10}.4H_2O$), Türkiye'nin bor madeni zenginliğinin bir yan ürünü olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu mineralin monoklinal kristal yapısı, birçok bor mineralinde de gözlemlenebilecek bir özelliktir. Seyitgazi'de bulunan Göcenoluk borat yatakları, tünelit mineralinin en önemli kaynaklarından biridir [76].



Şekil 2.12 Tünelit [77]

Tünelit mineraline ait fiziksel özellikler Tablo 2.15'de verilmiştir.

Tablo 2.13 Tünelit fiziksel özellikleri [77]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$SrB_6O_{10}.4H_2O$
Kristal Sistemi	Monoklinik
Sertlik (mohs)	2.5
Yoğunluk (g/cm^3)	2.4
Renk ve Şeffaflık	Renksiz, şeffaf
Parlaklık	İncili

2.3 Borun Kullanım Alanları

Dünyanın dört bir yanına dağılmış bor yatakları arasında, Türkiye öne çıkan bir konumdadır. Bu yataklar, Türkiye (%73), Rusya, Güney Amerika ve ABD'de yoğunlaşmaktadır. Türkiye'nin bor hazineleri ise Kestelek/Bursa, Bigadiç/Balıkesir, Emet/Kütahya ve Kırka/Eskişehir bölgelerinde yer almaktadır [78].

Bor endüstride birçok alanda kullanılmaktadır. Bor, sadece bir maden değil, günlük hayatımızın birçok alanında karşımıza çıkan, faydalı ve çok yönlü bir elementtir. Cam, seramik, deterjan, ilaç ve kimya sanayisinde hammadde olarak kullanılırken, yanıcı geciktirici, tarım gübresi, metal işleme malzemesi, enerji depolama çözümü, araba parçaları, su arıtma kimyasalı, boya ve mürekkep katkı maddesi, nükleer sanayi malzemesi ve daha birçok alanda karşımıza çıkar.

Bor mineralleri ve ürünleri, dünyanın farklı bölgelerinde farklı oranlarda ve farklı alanlarda kullanılmaktadır. ABD'de, bor tüketiminin büyük bir kısmı, fiberglas ve izolasyon malzemelerinin üretiminde kullanılmaktadır. Bu malzemeler, binalarda ve diğer yapılarda ısı ve ses yalıtımı için tercih edilir. Batı Avrupa'da bor, sabun ve deterjan üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bor içeren deterjanlar, daha iyi temizleme ve leke çıkarma performansı sunmaktadır. Japonya da ise, tekstil ve fiberglas sanayilerinde önemli bir hammaddedir. Bor içeren tekstil ürünleri, daha sağlam, dayanıklı ve kırışmaz özelliklere sahiptir [79].

Bor ürünlerinin %48'i, özellikle izolasyon ve tekstil tipi cam elyafı **ile** borosilikat cam üretiminde kullanılmaktadır. Bu cam türleri, sağlamlıkları, ısıya dayanıklılıkları ve kimyasal dirençleri ile öne çıkmaktadır. Bor ürünlerinin %16' sı tarım sektöründe gübre olarak kullanılmaktadır. Bor, bitkilerin sağlıklı büyümesi ve gelişmesi için gerekli bir mikro besindir. Bor ürünlerinin %16'sı seramik üretiminde akışkanlaştırıcı ve vitrifiye edici olarak kullanılmaktadır. Bor ürünlerinin %2'si deterjanlarda kir sökücü ve yumuşatıcı olarak kullanılmaktadır. Bor içeren deterjanlar, daha iyi temizleme ve leke çıkarma performansı sunar. Geriye kalan %20'lik kısım ise uzay, nükleer, polimer, nanoteknoloji, otomotiv ve enerji gibi ileri teknoloji alanlarında kullanılmaktadır. Bor, bu alanlarda hafiflik, sağlamlık, ısıya dayanıklılık ve radyasyon emici özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir [80].

Bor ürünleri, farklı sektörlerde ve farklı amaçlar için çeşitli kullanım şekillerine sahiptir. Mineral konsantre ve rafine bor ürünleri, uygunluk, fiyat ve tüketici tercihine göre birbirlerinin yerini alabilirken, bazı durumlarda da hammadde olarak kullanılabilmektedir. Bu durum, bor ürünlerinin kullanım alanlarının ve çeşitliliğinin geniş bir yelpazede olduğunu göstermektedir [81].

Tarım: Bor, bitkilerin sağlıklı büyümesi ve gelişmesi için hayati önem taşıyan bir mikro besindir. 1920'li yılların başından itibaren yapılan araştırmalar, borun bitkisel üretimdeki kritik rolünü kanıtlamıştır. Bor, düşük konsantrasyonlarda boratlar halinde mikro besin gübresi olarak kullanılır. Bu gübreler, bitkilerin ihtiyaç duyduğu bor miktarını sağlayarak sağlıklı bir şekilde gelişmelerine yardımcı olur. Ayrıca bitki örtüsünün gelişmesini artırmak veya kontrol etmek için kullanılabilir. Bu amaçla, bor mineralleri biyolojik gelişim ve kontrol kimyasallarında kullanılır.

Küfü önlemek için de kullanılabilir. Yavaş salınımlı gübre üretiminde, bitki hastalıklarına karşı koruyucu bakterisit ve fungisitlerde aktif bir bileşen olarak kullanılır [82].

Temizlik: Deterjanlarda iki ana beyazlatıcı bileşen aktif oksijen ve klordur. En yaygın kullanılan aktif oksijen kaynağı sodyum perborattır. Su ile temas ettiğinde oksijen salarak leke ve kirlerin parçalanmasını sağlar. Sodyum perborata benzer şekilde oksijen salarak leke ve kirleri temizleyen diğer kaynak ise sodyum perkarbonattır. En yaygun kullanılan klor kaynağı ise sodyum hipoklorür'dür. Klorlu sular ve bazı deterjanlarda bulunan beyazlatıcı madde olan sodyum hipoklorürün aynı zamanda mikrop öldürücü özelliği de vardır.

Tarihi 1800'lere uzanan bor bileşikleri, doğanın sunduğu en etkili temizlik maddelerinden biridir. Yeryüzünden çıkarılan bor madeninin fiziksel işlemlerden geçirilmesiyle elde edilen boraks, kimyasallara ihtiyaç duymadan doğal bir mucize sunmaktadır. Sodyum, su, oksijen ve bordan oluşan bu doğal bileşik, temizlik sektörüne yeni bir soluk getirmiştir.

Boratlar, leke çıkarmayı kolaylaştırma ve ağartma, enzimleri koruma, alkali dengeyi sağlama, suyu yumuşatma ve deterjanların performansını artırma gibi birçok özelliğe sahiptir. Doğal temizlik gücü ve çevre dostu özellikleri ile geleceğin temizlik çözümü olarak öne çıkmaktadır. Ar-Ge çalışmalarıyla boraksın temizlik sektöründeki kullanım alanları ve etkinliği daha da geliştirilerek, daha temiz ve sağlıklı bir dünya için önemli bir katkı sağlanabilir.

Cam: Isıya dayanıklı cam ve fiberglasın üretiminde boraks ve borik asit, önemli bir rol oynar. Bor, cam malzemelerde çok yönlü bir kullanım alanına sahiptir. Camın yapısına dahil olarak, dayanıklılığını ve performansını önemli ölçüde artırır. Bor, camda termal dayanım, kimyasal ve darbelere karşı direnci sağlar. Üretim sırasında

hem akış hem de ağ oluşturucu olarak görev yaparak camın ideal özelliklere sahip olmasını sağlar. Erime sıcaklığını düşürerek ve kristalleşmeyi engelleyerek enerji tasarrufuna katkıda bulunur.

Boratların viskoziteyi düşürme, termal şoka direnç ve devitrifikasyonu engelleme gibi özellikleri de camın zararlı koşullara karşı dayanıklılığını artırır. Bu sayede ısıya dayanıklı cam ve fiberglas, zorlu ortamlarda dahi uzun ömürlü ve güvenli kullanım imkanı sunar.

Bor, camın temel bir bileşeni olarak, modern dünyanın vazgeçilmez yapı malzemelerinden biri olan ısıya dayanıklı camın ve fiberglasın üretimine ve gelişmesine önemli katkılar sağlar.

Borosilikat cam, 100 yılı aşkın süredir bilim dünyası ve günlük yaşamımızda önemli bir yer tutan borosilikat cam, Otto Schott'un buluşundan beri güvenilirliği ve dayanıklılığıyla öne çıkmaktadır.

Farmasötik ambalajlarda devrim yaratan borosilikat cam, ampuller, küçük şişeler, şişeler ve kartuşlar gibi birincil cam ambalajların ideal malzemesi haline gelmiştir. Kimyasallara karşı direnci ve sağlamlığı sayesinde ilaç ve tıbbi ürünlerin korunması ve güvenli saklanması için mükemmel bir ortam sunar.

Laboratuvar cam gereçlerinde de sıklıkla kullanılan borosilikat cam, ısıya bağlı çatlamalara karşı direnci ile öne çıkar. Bu sayede deneylerde ve analizlerde güvenilir ve hassas sonuçlar elde edilmesini sağlar.

Evlerde ise borosilikat cam, ölçü kapları, fırın kapları ve içecek bardakları gibi birçok farklı üründe karşımıza çıkar. Isıya dayanıklılığı ve şeffaflığı sayesinde hem pratik hem de estetik bir kullanım imkanı sunar.

Geçmişte katot ışınlı tüpler kullanan televizyonlardan aşina olduğumuz düz panel ekran camı, boratların katkısıyla bambaşka bir boyut kazanmıştır. Bu ekranlar, boratlar sayesinde hem güç hem de şeffaflık kazanarak evlerimizde ve iş yerlerimizde yeni bir çağ açmıştır.

Boratlar, düz panel ekran camında kullanılan önemli bir bileşendir. Bu bileşenler sayesinde ekranlar daha hafif, daha ince ve daha dayanıklı hale gelmiştir. Ayrıca boratlar, ekranların daha parlak ve daha net görüntüler sunmasına da katkıda bulunur.

Seramikler: Seramik ve emayelerde yüzyıllardır kullanılan boratlar, bu malzemelerin vazgeçilmez bir bileşeni haline gelmiştir. Sırları veya emayeleri yapıştırmak için kullanılan boratlar, aynı zamanda dayanıklılıklarını ve parlaklıklarını da önemli ölçüde artırır. Son yıllarda boratlar, sadece sırlarda değil, seramik karo gövdelerinde de temel bir bileşen olarak kabul görmeye başlamıştır. Bu sayede üreticiler, daha geniş bir kil yelpazesi kullanma, üretkenliği artırma ve enerji kullanımını azaltma imkanı bulmaktadır.

Fiberglas: Dünyadaki borat kullanımının büyük bir kısmını oluşturan fiberglas, boratların en önemli kullanım alanlarından biridir. Yalıtım fiberglasında ve devre kartlarından sörf tahtalarına kadar uzanan geniş bir yelpazedeki tekstil fiberglasında boratlar kritik bir rol oynar. Bu iki üründe de boratlar, güçlü bir akışkan görevi görerek cam parçacıklarının erime sıcaklığını düşürür. Bu sayede fiberglas üretiminin enerji verimliliği artar ve üretim maliyetleri düşer.

Boratlar, optimum cam liflerinin oluşmasını sağlamak için sıcaklık, viskozite ve yüzey gerilimi arasındaki hassas dengeyi de kontrol eder. Bu sayede fiberglas, güçlü, dayanıklı ve hafif bir malzeme haline gelir.

Nükleer uygulamalar: 2450°C gibi yüksek bir erime noktasına sahip olan bor karbür, kimyasallara ve radyasyona karşı dirençli, son derece sert bir malzemedir. Özgül ağırlığı 2.4 (g/cm^3) olan bor karbür, elmas ve bor nitrürden sonra en sert ve dayanıklı malzemelerden biridir. Bu olağanüstü özellikleri sayesinde bor karbür, savunma sanayi (askeri araçlarda) ve uçakların yapımında kritik bir rol oynar. Bor karbürün bir diğer önemli özelliği ise nötron emici özelliğidir. Bu sayede bor karbür, nükleer enerji santrallerinde denetim çubukları yapımında kullanılır.

Denetim çubukları, nükleer reaksiyonu kontrol etmek ve istenmeyen nükleer kazaları önlemek için kritik öneme sahiptir. Ukrayna'da Çernobil Nükleer Santralinde, reaktör çekirdeğinin erimesi ve patlama tehlikesi ortaya çıkmıştır. Bu felaketin daha da büyük bir faciaya dönüşmesini önlemek için, askeri helikopterler ile ana ergimiş kütle üzerine 5.000 ton bor içerikli karışımlar atılmıştır. Daha sonra ise reaktörün üstü borlu çimento ile kaplanmıştır. Bor karbürün nötron emici özelliği sayesinde bu işlem, patlamayı önlemede ve felaketin sonuçlarını hafifletmede kritik bir rol oynamıştır [83]. Bor, sadece cam ve seramik üretiminde

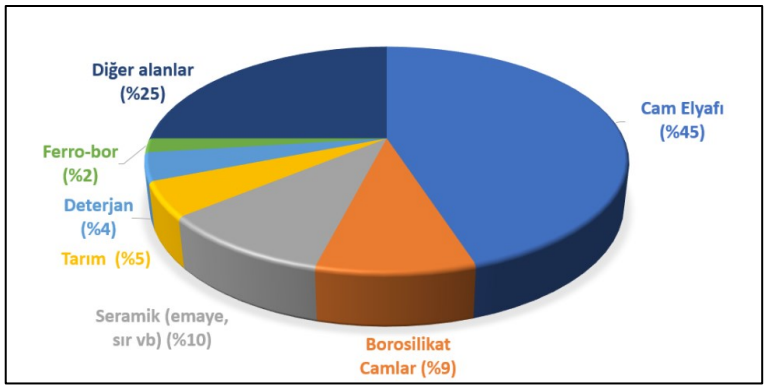
değil, otomotivden nanoteknolojiden mumyalamaya kadar birçok farklı alanda da gücü ve koruyucu özellikleriyle öne çıkmaktadır.

Otomotiv Sektöründe: hava yastıklarının hızlı ve güvenli bir şekilde şişmesini sağlayan kritik bir bileşendir. Çarpışma anında, elementel bor ve potasyum nitrat tozunun karışımı elektronik sensör tarafından tetiklenerek hava yastığının açılmasını sağlar. Otomobillerde kullanılan antifrizin donma noktasını düşürerek soğutma sisteminin korunmasına yardımcı olur. Bor ve bor ürünleri, füze ve uçuş yakıtlarında yanma verimliliğini artırmak ve itici gücü yükseltmek için kullanılır. Özel uygulamalarda yakıt katkı maddesi olarak da kullanılabilir.

Nanoteknolojide: Bor, nanoteknolojide koruyucu ve mukavemet arttırıcı özelliklere sahip nano kaplamalar üretmek için kullanılır. Bu kaplamalar, çeşitli malzemelerin ömrünü uzatmak ve direncini artırmak için kullanılabilir.

Borun Diğer Kullanım Alanları:

Bor, fiber optik kabloların üretiminde kullanılır. Kauçuk ve plastik ürünlerin dayanıklılığı ve esnekliğini artırmak ve bazı kozmetik ürünlerde cilt bakım ve yaşlanma karşıtı özellikleri için de tercih edilmektedir. Fotoğrafçılıkta bazı kimyasalların bileşenleri olarak kullanıldığı gibi havai fişek ve patlayıcı maddelerde renk ve özel efektler oluşturmak içinde kullanılmaktadır. Bazı manyetik cihazlarda manyetik alanları güçlendirmek için kullanılır. Ayrıca bor, çeşitli ileri teknoloji araştırmalarında yeni malzemeler ve uygulamalar geliştirmek ve mumyalama işleminde dokuları korumak ve bozulmayı önlemek için kullanılır. Bor madenin kullanım alanlarına (Tablo 2.16) ait yüzde değerler (Şekil 2.14)'te verilmiştir.



Şekil 2.13 Bor tüketiminin nihai kullanım alanlarına göre dağılımı [84]

Tablo 2.14 Bor'un kullanım alanları [85]

Ürün	Kullanım Alanları
Amorf Bor	Askeri Piroteknik
Bor Esterleri	Polimer Stabilizatörleri, Yangın Geciktiricileri ve Polimerizasyon Reaksiyonları için Katalist,
Bor Flamentleri	Spor malzemeleri ve Havacılık için Kompozitler
Bor Halidleri(tuzları)	Elektronik Parçalar, İlaç Sanayii, Fiber Optikler Katalistler ve Bor Flamentleri
Borik Asit	Cam, seramik, nükleer enerji, metalürji, tarım ve medikal sektör
Disodyum Metaborat	Zirai ilaçlama, fotoğrafcılık, tekstil, deterjanlar, Yapıştırıcı.
Disodyum Oktaborat Tetrahidrat	Gübre, ağaç koruyucular ve tarım ilaçları, yangın söndürücü.
Fluoborik Asit	Kaplama Solüsyonları, Fluoborat Tuzlar, Sodyum Bor Hidrürler
Kalsiyum Bor Cevheri (Kolemanit)	Metalurjik curuf yapıcı, Tekstil kalite cam elyafı, nükleer atık depolama ve bor alaşımları.
Kristalin Bor	Nükleer Güç Reaktörlerinde Muhafaza ve Silahlar
Özel Sodyum Boratlar	Tekstil, Fotoğrafçılık, deterjan, yapıştırıcılık, yangın güvenliği ve tarım
Rafine Boraks Dekahidrat	Yapıştırıcı
Rafine Boraks Pentahidrat	Kozmetik, tarım, ilaç, sanayi ve inşaat, çimento.
Sodyum Bor Cevherleri	Yalıtım cam elyafı,
Sodyum Bor Hidrürler (Sodyum Borohidrat)	Kağıt Hamurunu Beyazlaştırma, Özel Kimyasalları Saflaştırma ve Metal Yüzeylerin Temizlenmesi
Sodyum Pentaborat	Gübre ve yangın geciktiriciler.
Sodyum Perborat	Beyazlatıcı ve deterjan, bazı diş macunları ve dezenfektan, tekstil.
Susuz Boraks	Cam, gübre, emaye- sır, metalurjik curuf yapıcı, cam elyaf, , kaynak-lehimcilik ve yangın geciktirici
Tinkal	Sodyum perborat, rafine borların üretimi (deka-penta), metaborat, pentaborat ve susuz boraks.
Trimetil Borat	Sodyum Bor Hidrürler
Üleksit ve Probertit	Gübre ve borosilikat camlar

2.4 Türkiye ve Dünyadaki Durum

2.4.1 Türkiye'deki Durumu

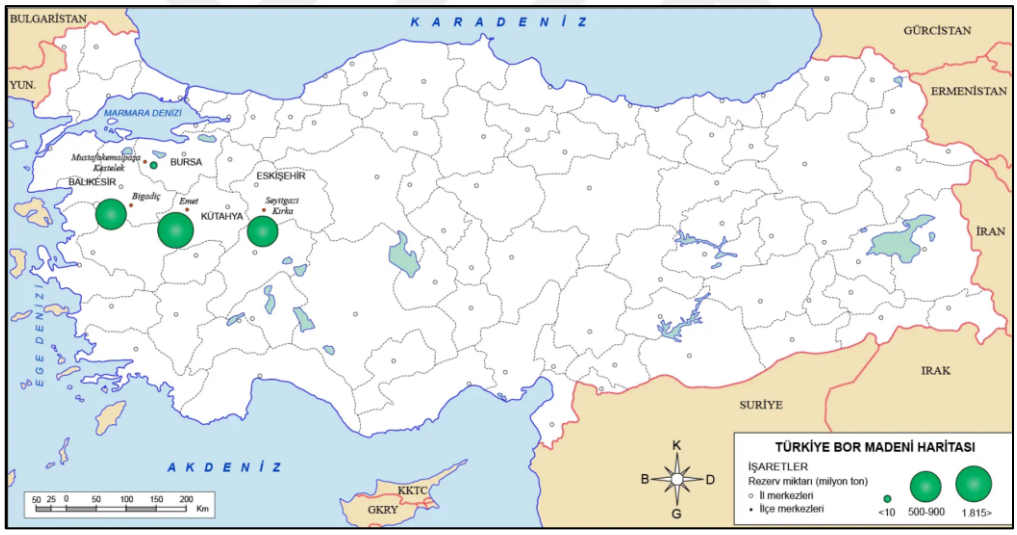
Dünya bor rezervlerinin %73'üne ev sahipliği yapan Türkiye, bu eşsiz maden kaynağıyla öne çıkmaktadır. Ülkemizin farklı bölgelerinde bulunan bor yatakları, farklı mineraller ve zengin rezervler barındırarak Türkiye'yi bor madeni konusunda lider bir konuma taşımaktadır [86]. Türkiye bor maden haritası Harita 2.1'de verilmiştir. Türkiye'deki bilinen bor yatakları:

Eskişehir-Kırka: Bu bölge, Tinkal minerali bakımından oldukça zengindir.

Kütahya-Emet: Hem Tinkal hem de Kolemanit mineralleri açısından önemli bir yataktır.

Balıkesir-Bigadiç: Kolemanit ve Üleksit mineralleri bakımından zengin bir bölgedir.

Bursa-Kestelek: Kolemanit minerali ve yan ürün olarak Üleksit elde edilmektedir.



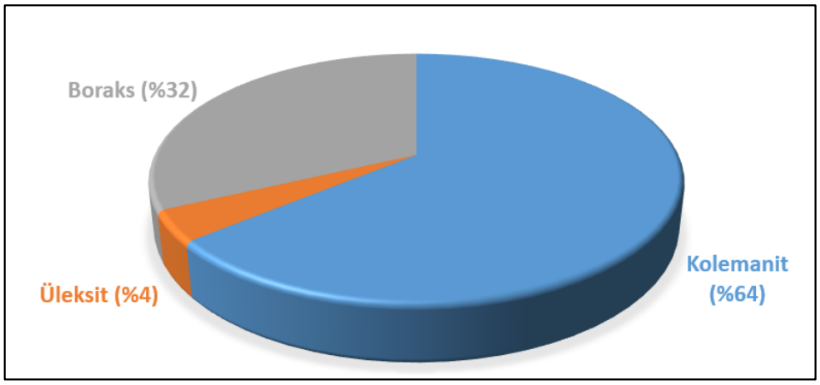
Harita 2.1 Türkiye bor madeni haritası [87]

Eskişehir'in Kırka bölgesinde çıkarılan "boraks" (tinkal), Kütahya'nın Emet, Balıkesir'in Bigadiç ve Bursa'nın Kestelek bölgelerinden ise "kolemanit" ve "üleksit" çıkarılarak işlenmesiyle Türkiye, dünya bor pazarlarında önemli bir yere sahiptir. 1980 ile 2008 yılları arasında, kolemanit üretiminde zirveye çıkarak dünya lideri konumuna gelmiştir. Ülkemizin sahip olduğu görünür ve olası bor rezervleri ise şu an ki üretime kıyasla çok daha büyük potansiyele işaret etmektedir. Türkiye borat yataklarında bulunan bor mineralleri Tablo 2.17'de verilmiştir.

Tablo 2.15 Türkiye borat yataklarında bulunan bor mineralleri (+ var, - yok) [86]

	Mineral	**Formül**	**Türkiye'deki Bor Yatakları**				
			Bigadiç	Sultançayır	Kestelek	Emet	Kırka
Ca-Boratlar	İnyoit	$Ca_2B_6O_{11}.13H_2O$	+	-	-	-	+
	Meyerhofferit	$Ca_2B_6O_{11}.7\ H_2O$	+	-	-	+	+
	Kolemanit	$Ca_2B_6O_{11}.5\ H_2O$	+	+	+	+	+
	Terşit	$Ca_4B_{10}O_{19}.20\ H_2O$	+	-	-	-	-
	Pandermit	$Ca_4B_{10}O_{19}.7\ H_2O$	+	+	-	-	+
Ca-Na Boratlar	Üleksit	$NaCaB_5O_9.8\ H_2O$	+	-	-	-	+
	Probertit	$NaCaB_5O_9.5\ H_2O$	+	-	+	-	-
Na-Boratlar	Boraks	$Na_2B_4O_7.10\ H_2O$ -	-	-	-	-	+
	Tinkalkonit	$Na_2B_4O_7.5\ H_2O$	-	-	-	-	+
	Kernit	$Na_2B_4O_7.4\ H_2O$	-	-	-	-	+
Diğer Boratlar							
(Mg)	Hidroborasit	$CaMgB_6O_{11}.6\ H_2O$	+	-	-	-	+
	İnderborit	$CaMg\ B_6O_{11}.11\ H_2O$	-	-	-	-	+
	İnderit	$Mg_2\ B_6O_{11}.15\ H_2O$	-	-	-	-	+
	Kurnakovit	$Mg_2\ B_6O_{11}.15\ H_2O$	-	-	-	-	+
	Rivadavit	$Na_6MgB_{24}O_{40}.22\ H_2O$	+	-	-	-	-
(Sr)	Tünellit	$rB_6O_{10}.4\ H_2O$	+	-	-	+	+
	Viçit-A S	$Sr_4B_{22}O_{37}.7\ H_2O$	-	-	-	+	-
(As)	Terrujit	$Ca_4MgAs_2B_{12}O_{28}.20\ H_2O$	-	-	-	+	-
	Kahnit	$Ca_2BAsO_6.2\ H_2O$	-	-	-	+	-
(Si)	Havlit	$Ca_4Si_2B_{10}O_{23}.5\ H_2O$	+	+	-	-	-
	Bakerit	$Ca_8B_{10}Si_6O_{35}.5\ H_2O$	-	+	-	-	-

Türkiye bor rezervleri cevher tipi ve oranları Şekil 2.15’ te verilmiştir.



Şekil 2.14 Türkiye bor rezervleri cevher tipi ve oranları [88]

Türkiye, dünya bor rezervlerinde lider konumdadır. Bu eşsiz zenginlik, ülkemize hem ekonomik hem de stratejik açıdan önemli bir güç kazandırmaktadır.

Bor üretiminde Türkiye, son yıllarda önemli bir ivme yakalamıştır. 2016 yılında 1 milyon 775 bin ton, 2017 yılında 2 milyon 200 bin ton, 2018 yılında 2 milyon 400 bin ton ve 2023 yılında ise 2 milyon 650 bin ton rafine bor satışı gerçekleştiren Türkiye, bu sayede 1 milyar 300 milyon dolarlık ihracat geliri elde etmiştir.

Bu olağanüstü başarının arkasında, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'nün önemli rolü yatmaktadır. 2840 sayılı Kanun gereği, Türkiye'de bulunan bor madenlerinin aranması, çıkarılması, işlenmesi ve pazarlanması yetkisi Eti Maden'e verilmiştir. Türkiye'nin bor madenciliği ve işleme sektöründe öncü bir konumda olmasını sağlamıştır.

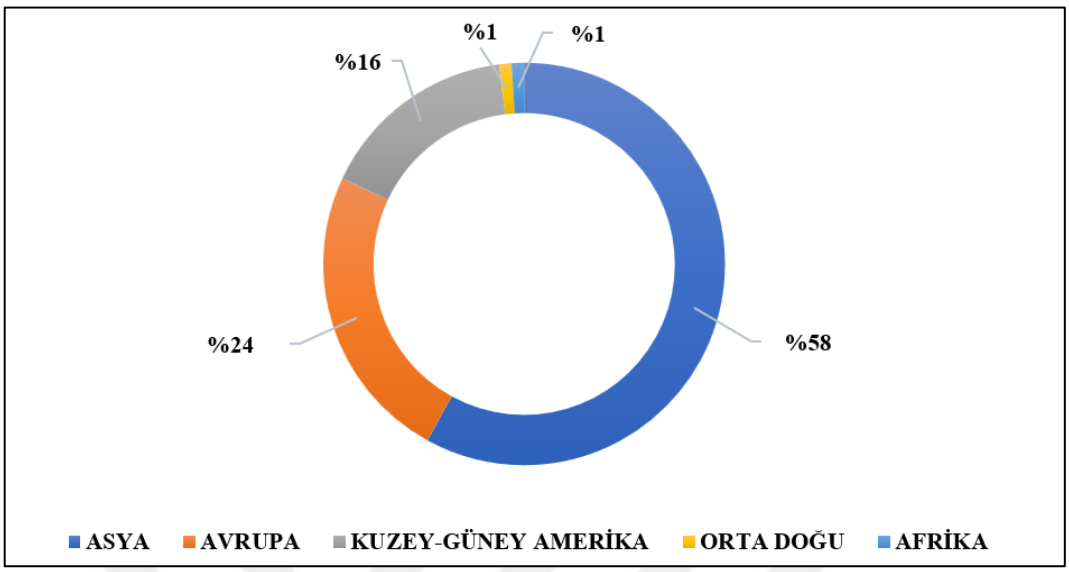
Mineral bazında rezerv miktarları Tablo 2.18’de verilmiştir.

Tablo 2.16 Eti Maden rezerv miktarları [31]

HAVZA ADI	**MİKTAR (Ton)**
Emet (Kolemanit-Üleksit-Probertit)	1.803.491.939
Kırka (Tinkal)	811.468.299
Bigadiç (Kolemanit-Üleksit)	614.649.966
Kestelek (Kolemanit)	5.254.923
TOPLAM	**3.234.865.128**

Dünyada en yüksek bor üretimi Türkiye’de gerçekleştirilmektedir. Ülke içerisinde bor talebinin tamamını karşılayabilmektedir. Bor talebi en çok cam ve seramik

endüstrisinde oluşmaktadır. 2023 yılı Etimaden ihracat miktarı- bölgelere göre dağılımı Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.15 2023 yılı Etimaden ihracat miktarı- bölgelere göre dağılım [31]

2.4.2 Dünyadaki Durumu

Bor madenciliği, dünya çapında oldukça eski bir geçmişe sahiptir. 1852 yılında Şili'de ilk endüstriyel bor madenciliği faaliyetleri başlamıştır. Bu keşfin ardından ABD'deki bor yatakları da işletmeye alınarak, ABD bir süreliğine dünya bor ihtiyacını karşılayan tek ülke olmuştur. Osmanlı İmparatorluğu döneminde ise bor madenciliği 1865 yılında ivme kazanmıştır. Bu tarihte Fransız bir şirkete verilen imtiyazlar ile bor işletme faaliyetleri başlamış ve bu sayede Osmanlı da bor madenciliğinde önemli bir rol oynamaya başlamıştır [89]. Dünyanın en değerli maden kaynaklarından biri olan bor, belirli bölgelerde yoğunlaşmış halde bulunmaktadır. Bu bölgeler, tıpkı birer hazine gibi, bor madenlerini barındırır ve dünya ekonomisi için büyük önem taşır. En önemli bor yatakları 4 bölgede yer alır:

ABD'nin Mojave Çölü: Kaliforniya Eyaletinin güneyinde yer alan Mojave Çölü, bor yatakları bakımından oldukça zengindir. Bu bölgedeki bor madenleri, Amerika Birleşik Devletleri'nin bor üretiminde önemli bir rol oynar.

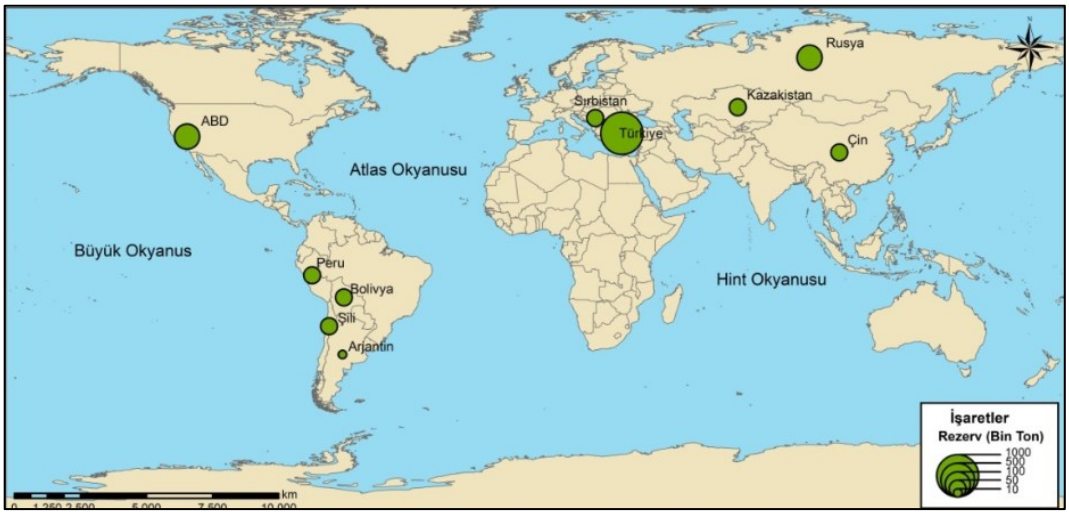
Güney Amerika'daki And Kemeri: And Dağları boyunca uzanan bu kemer, bor yatakları bakımından oldukça zengindir. Şili, Bolivya ve Arjantin gibi ülkeler, bu bölgedeki bor yataklarından önemli miktarda bor üretmektedir.

Güney-Orta Asya Orojenik Kemeri: Türkiye'nin de dahil olduğu bu kemer, dünyanın en büyük bor rezervlerine ev sahipliği yapmaktadır. Türkiye, bor üretiminde dünya lideri konumdadır ve bu bölgedeki bor yatakları bu başarının temelini oluşturmaktadır.

Doğu Rusya: Uzak Doğu'da yer alan bu bölge de bor yatakları bakımından önemlidir. Rusya, bor üretiminde önemli bir yere sahiptir ve bu bölgedeki bor yatakları da bu üretime katkıda bulunmaktadır.

Bu 4 bölgedeki bor yatakları, dünya ticari bor rezervlerinin tamamını oluşturmaktadır. Bor, cam, seramik, deterjan ve birçok sanayi dalında kullanılan önemli bir maddedir. Bu nedenle, bor yatakları dünya ekonomisi için büyük önem taşımaktadır.

ABD'nin Mojave Çölü'ndeki Boron (Kramer) Yatakları, Searles Lake Yatağı ve Fort Cady Kalsiyum Bor Yatağı, Sırbistan ve Güney Amerika'daki Tincalayu, Salar de Olaroz, Salar de Surire, Salar de Uyuni ve Salar de Carcote gibi yataklar da önemli bor rezervlerine ev sahipliği yapmaktadır. Bu yataklar, farklı bor türleri ve mineralleri barındırarak dünya bor üretiminde önemli bir rol oynamaktadır [90]. Dünya bor rezerv haritası Harita 2.2'de verilmiştir.



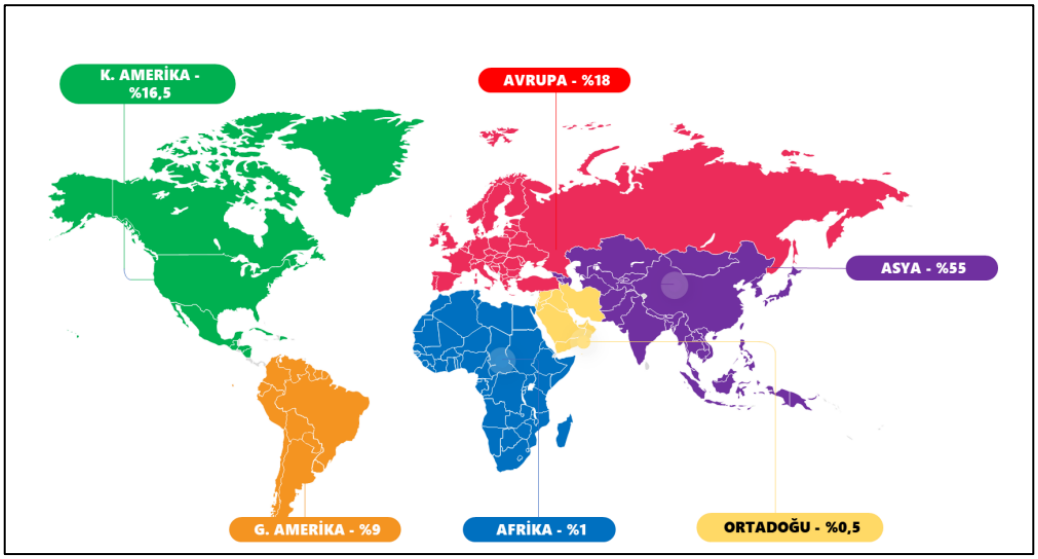
Harita 2.2 Dünya bor madeni rezerv haritası [87]

Bor, dünya ekonomisi için önemli bir hammaddedir ve birçok sanayi dalında kullanılmaktadır. Dünyadaki en büyük bor ihracatçıları ise Türkiye, ABD, Güney Amerika ülkeleri ve Rusya'dır [91].

Bor mineralleri, doğada bulunan ve farklı oranlarda bor oksit içeren maddelerdir. Dünyada yüzlerce bor minerali bulunsada, ticari açıdan önemli olanlar oldukça azdır. Bu minerallerin değeri, içerdikleri bor oksit oranıyla doğru orantılıdır. Yani, bir bor mineralinde ne kadar çok bor oksit varsa, o mineral o kadar değerlidir. Dünya bor rezervleri ülkelere göre dağılımı Tablo 2.19'da verilmiştir. Bölgelere göre bor tüketim yüzdeleri Şekil 2.17'de gösterilmiştir.

Tablo 2.17 Dünya bor rezervleri [31]

Ülkeler	**Toplam Rezerv (Bin Ton B_2O_3)**	**Dağılım (%)**
Türkiye	939.782	73,3
Rusya	100.000	7,8
A.B.D	80.000	6,2
Şili	41.000	3,2
Çin	36.000	2,8
Peru	22.000	1,7
Sırbistan	21.000	1,6
Bolivya	19.000	1,5
Kazakistan	15.000	1,2
Arjantin	9.000	0,7
TOPLAM	**1.282.782**	**100**



Şekil 2.16 2023 yılı bölgelere göre bor tüketimi [31]

2.5 Borun Önemi

Dünyada bazı madenler, belirli coğrafyalarda yoğunlaşmış ve nadir bulunan bir yapıya sahiptir. Bu tür madenlere stratejik madenler adı verilir. Askeri, ekonomi ve endüstriyel sanayi açısından kritik öneme sahip olan bu madenlerin ikamesi oldukça zor ve maliyetlidir. Bu nedenle, ülkeler stratejik madenlere erişim ve kontrolünü elde etmek için büyük çaba sarf ederler [92]. Bor, sadece bir maden değil, aynı zamanda ulusal kalkınmanın ve gelişmenin anahtarıdır. Önemli bir stratejik maden kaynağı olarak bor, ulusal olarak gelişen stratejik endüstrilerin gelişiminde kritik bir rol oynamaktadır.

Bor minerali nadir bir element olup ametaller grubuna aittir [93]. Diemer'e göre bor mineralinin "kritik" 26 mineral arasında yer aldığı belirlenmiştir [94]. Jin ve arkadaşları tarafından yürütülen kritiklik çalışmaları incelemesine göre bor minerali, ekonomi için ihtiyaç duyulan bir mineral olarak sınıflandırıldığından "önemli" olarak belirlenmiştir [95]. Henckens ve arkadaşları [96] tarafından bor, jeolojik olarak kıt bir kaynak olarak adlandırılmıştır. Bor çok sayıda endüstri ve hatta tek tek ülkelerin ekonomileri, savunmaları ve politikaları için önemli bir malzemedir. Hemen hemen tüm endüstrilerin üretimi için bora ihtiyacı vardır. Rezerv ve üretim bakımından dünyanın en büyük ülkesi olan Türkiye, bor cevheri uluslararası ticaretinde mutlak ihracat inisiyatifini elinde bulundurmaktadır [97].

Türkiye, sadece toprağıyla değil, yeraltındaki hazineleriyle de zengin bir ülkedir. Bu hazinelerden biri de bor mineralleridir. Ülkemiz bor mineralleri bakımından dünyanın en şanslı ülkelerinden biridir ve bu minerallerin yüksek kalite standartlarına uygun olarak, modern üretim tesislerinde üretilmektedir. Bu durum, boru ülkemiz için büyük bir öneme sahip kılmaktadır. Ancak bu kadar zengin bir kaynağın sadece çıkarılıp satılması yeterli değildir. Türkiye'nin bu kaynaklardan en iyi şekilde yararlanabilmesi için borun yeni kullanım alanlarına ve endüstrilerin oluşturulmasına yönelik çalışmalar yapılması gerekmektedir. Borun çevreye duyarlı uygulamalarda kullanımı için bilimsel çalışmaların desteklenmesi gerekmektedir [98]. Türkiye'nin bor madenlerinden en fazla getiriyi elde edebilmesi için bu sektörün yeniden yapılandırılması ve organize edilmesi gerekmektedir. Bu yeniden yapılanma ile bor madenlerinin ham veya yarı mamul ürün olarak değil, yüksek katma değerli nihai ürünlere dönüştürülmesi hedeflenmeli, bu doğrultuda araştırma ve teknoloji geliştirme faaliyetlerine ağırlık verilmelidir.

3
MAGNEZYUM BORAT

3.1 Magnezyum Borat Mineralleri

Magnezyum boratlar doğal olarak bulunabildiği gibi sentetik olanları da mevcuttur. Çin, doğal magnezyum borat elde etme konusunda iki ana yönteme sahiptir:

Yeraltı Madenciliği: Çin, Kuzey Kore Yarımadası'nda bulunan bor yataklarından madencilik yöntemiyle doğal magnezyum borat elde etmektedir.

Deniz Suyu İşlemesi: Çin, deniz suyundan çift tuz dönüşümü yoluyla da doğal magnezyum borat üretmektedir.

Yapay sentez yönteminde ise, magnezyum ve bor bileşikleri kullanılarak laboratuvar ortamında magnezyum borat sentezlenmektedir. Magnezyum borat mineralleri, kimyasal yapıları ve özellikleri bakımından üç farklı kategoride incelenebilir. Tablo 3.1'de magnezyum borat mineralleri verilmektedir.

Tablo 3.18 Magnezyum Borat Mineralleri

Magnezyum Borat Mineralleri		
Kristal Sulu Magnezyum Boratlar	Paternoyit	: $MgB_8O_{13}.4H_2O$
	İnderit	: $2MgO.3(B_2O_3).15H_2O$
	Kurnakovit	: $Mg_2B_6O_{11}.15H_2O$
	Pinnoit	: $MgB_2O_4.3H_2O$
	Admontit	: $MgB_6O_7(OH)_6.4H_2O$
	Mkalisterit	: $Mg_2(B_6O_7(OH)_6)_2.9H_2O$
Susuz Magnezyum Boratlar	Suanit	: $Mg_2B_2O_5$
	Kotoit	: $Mg_3B_2O_6$
Klor İçerikli Magnezyum Boratlar	Borasit	: $Mg_3B_7O_{13}Cl$
	Shabinit	: $Mg_5(BO_3)(Cl,OH)_2.4H_2O$
	Karlit	: $Mg_7(BO_3)_3(OH,Cl)_5$

Doğada çeşitli mineraller halinde bulunan magnezyum boratlar, sadece temizlik maddesi olarak değil, aynı zamanda değerli bir endüstriyel hammadde kaynağı olarak da öne çıkmaktadır. Bu minerallerin tercih edilmesinin temel sebebi, sahip oldukları olağanüstü termal ve mekanik özelliklerdir. Yüksek saflıkta bor elde etmek, karmaşık ve maliyetli bir süreçtir. Bu noktada magnezyum borat mineralleri, yüksek bor içeriği sayesinde dünya pazarında hammadde ihtiyacını karşılayabilecek önemli bir potansiyele sahiptir [99].

Magnezyum boratlar, sahip oldukları hem magnezyum hem de bor içeriği sayesinde birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarından bazıları şunlardır:

Toprağın Arındırılması: Magnezyum boratlar, toprağı pestisitlerden arındırmak için kullanılabilir. Bu, tarım arazilerindeki verimi ve gıda ürünlerinin güvenliğini artırmaya yardımcı olur.

Süper İletkenler: Magnezyum diborür, süperiletkenlik özelliğine sahip bir malzemedir. Bu malzeme, elektrik üretiminde ve tıbbi görüntülemede devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Magnezyum boratlar, süperiletken magnezyum diborürün üretiminde hammadde olarak kullanılır.

Yağlarda Sürtünmeyi Azaltma: Magnezyum boratlar, yağlara eklenerek sürtünmeyi azaltmaya yardımcı olabilir. Bu, motorların ve diğer makinelerin daha verimli çalışmasını sağlayarak enerji tasarrufu sağlar.

Metal Yüzey Kaplama: Magnezyum boratlar, metal yüzeyleri korozyondan korumak için kullanılan yalıtkan kaplama bileşimlerinde kullanılabilir. Bu, binalarda ve altyapıda kullanılan metal yapıların ömrünü uzatmaya yardımcı olur.

Isıya Duyarlı Mürekkep: Magnezyum boratlar, ısıya duyarlı renk veren mürekkep bileşimlerinde kullanılabilir. Bu mürekkepler, belgelerin sahteciliğini önlemek ve termal yazıcılarda kullanılmak için idealdir.

Boyalarda Korozyon Önleme: Magnezyum boratlar, boyalara eklenerek korozyonu önlemeye yardımcı olabilir. Bu, binalarda ve diğer yapılarda kullanılan metal yapıların ömrünü uzatmaya yardımcı olur.

Deterjanlarda Topaklanmayı Önleme: Magnezyum boratlar, deterjan bileşimlerinde topaklanmayı önlemek için kullanılabilir. Bu, deterjanların daha kolay çözünmesini ve daha etkili temizlik yapmasını sağlar.

Kontakt Lens Yıkama Suları: Magnezyum boratlar, kontakt lens yıkama sularında dezenfektan olarak kullanılabilir. Bu, göz enfeksiyonlarının önlenmesine yardımcı olur.

Ahşap Koruma: Magnezyum boratlar, ahşabı böcek ve mantarlardan korumak için kullanılan yanmayı geciktirici bileşiklerde kullanılabilir. Bu, ahşap yapıların ömrünü uzatmaya ve yangın riskini azaltmaya yardımcı olur [100].

3.1.1 Kristal Sulu Magnezyum Boratlar

Kristal sulu magnezyum boratlar, magnezyum, bor ve sudan oluşan inorganik bileşiklerdir. Doğada bulunabilir veya sentetik olarak üretilebilirler.

- **Paternoyit ($MgB_8O_{13}.4H_2O$)**

Paternit, keşfini yapan İtalyan kimyager Emanuele Paterno tarafından adını alan nadir bir bor mineralidir. Sicilya'daki Monte Sambuco tuz yataklarındaki Blödit tabakaları arasında küçük yumrular halinde bulunur.

Ticari öneme sahip olmasa da, Paternit mineralojik açıdan oldukça ilginçtir. Nadir olması ve özgün kristalografik yapısı nedeniyle bilimsel araştırmalarda ilgi çekmektedir. Yoğunluğu 2.11'dir. Beyaz renkte ve saydamdır. Kimyasal bileşimi %0.36 Na_2O, %1.06 SO_3, %1.08 Na_2O, %2.35 Cl, %10.93 MgO, %19.16 H_2O ve %66.02 B_2O_3şeklindedir [101].

- **İnderit ($2MgO.3(B_2O_3).15H_2O$)**

Lesserit olarak da bilinen İnderit (Şekil 3.1), adını Kazakistan'daki Inder Dağları yakınındaki Inder gölünden alan bir mineraldir. Kimyasal bileşimi %14.34 MgO, %35.60 B_2O_3 ve %48.20 H_2O'dur. 600 ^oC'de ergir. Sıcak ve soğuk suda erimez ve seyreltik sıcak asitlerde erimektedir [102]. Minerale ait özellikler Tablo 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1 İnderit [103]

Tablo 3.19 İnderit fiziksel özellikleri [103]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$2MgO._3(B_2O_3).15H_2O$
Kristal Sistemi	Monoklinik
Sertlik (mohs)	2.5
Yoğunluk (g/cm^3)	1.8
Renk ve Şeffaflık	Renksiz, Beyaz, pembe, şeffaf
Parlaklık	Camsı

- **Kurnakovit ($Mg_2B_6O_{11}.15H_2O$)**

Kurnakovit, Rus minerolog Nikolai Semyonovich Kurnakov tarafından keşfedilen ve adını ondan alan sert ve beyaz bir bor mineralidir. Toplu kristaller halinde bulunur ve monoklinik kristal sistemine sahiptir. Kurnakovit (Şekil 3.2), camsı bir parlaklığa sahip olup, özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Kimyasal analizi %15,46 MgO, %37,58 B_2O_3 ve %47,09 H_2O içeren bir magnezyum borat hidratıdır. Suda çözünmez, ancak sıcak asitlerde çözünmektedir. Kurnakovit, Kazakistan'daki Inder boraks yataklarında bulunur [104].



Şekil 3.2 Kurnakovit [105]

Tablo 3.20 Kurnakovit fiziksel özellikleri [106]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$Mg_2B_6O_{11}.15H_2O$
Kristal Sistemi	Monoklinik
Sertlik (mohs)	3
Yoğunluk (g/cm^3)	1.83
Renk ve Şeffaflık	Renksiz, beyaz, şeffaf
Parlaklık	İncili

- **Pinnoit ($MgB_2O_4.3H_2O$)**

İsmini Johann Friedrich Hermann Pinno'dan almıştır. Tetragonal kristal sisteminde kristalleşir ve nadiren kısa prizmatik kristaller olarak oluşur [107]. Pinnoit (Şekil 3.3) özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Pinnoit [108]

Tablo 3.21 Pinnoit fiziksel özellikleri [107]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$MgB_2O_4.3H_2O$
Kristal Sistemi	Tetragonal
Sertlik (mohs)	3.5
Yoğunluk (g/cm^3)	2.29
Renk ve Şeffaflık	Renksiz, sarı, sarı yeşil, yarı saydam
Parlaklık	Camsı

- **Admontit ($MgB_6O_7(OH)_6.4H_2O$)**

Admontit (Şekil 3.4), hassas ve nadir bir magnezyum borat minerali olup, karakteristik özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir. Monoklinik kristal yapısına sahip olmasına rağmen, kristalleri zayıf bir şekilde gelişmiştir. Genellikle alçı yataklarında bulunur [109].



Şekil 3.4 Admontit [110]

Tablo 3.22 Admontit fiziksel özellikleri [110]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$MgB_6O_7(OH)_6.4H_2O$
Kristal Sistemi	Monoklinik
Sertlik (mohs)	2-3
Yoğunluk (g/cm^3)	1.82
Renk ve Şeffaflık	Renksiz, sarı, şeffaf, yarı saydam
Parlaklık	Camsı

- **Mkalisterit ($Mg_2(B_6O_7(OH)_6)_2.9H_2O$)**

Mcallisterit, 1965 yılında Kaliforniya'da keşfedilen nadir bir magnezyum hekzaborat hidrat mineralidir. %16.88 oranında bor içeren Mcallisterit, bazalt taşı damarlarında bulunur [111, 112].

3.1.2 Susuz Magnezyum Boratlar

- **Suanit ($Mg_2B_2O_5$)**

Suanit, ismini ilk keşfedildiği bölge olan Kuzey Kore'nin Suan bölgesinden alan nadir bir bor mineralidir. Bu özel mineral, 1939 yılında Tokyo Üniversitesi'nden Japon araştırmacı Takeo Watanabe tarafından keşfedilmiştir.

Suanit (Şekil 3.5) sadece Fransa'da ve Çin'de bulunur. Bu nadir mineral, bor yataklarının hidrotermal metasomatik temas süreci adı verilen jeolojik bir olay sonucu oluşur. Bu karmaşık süreç, yüksek sıcaklık ve basınç altında sıcak suların kayaların kimyasal bileşimini değiştirmesini içerir. Suanit'in nadirliği, dünya çapında sadece 20 kez keşfedilmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, minerali bilim insanları için oldukça ilgi çekici ve değerli kılmaktadır [113].



Şekil 3.5 Suanit [114]

Suanit mineralinin özellikleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.23 Suanit fiziksel özellikleri [115]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$Mg_2B_2O_5$
Kristal Sistemi	Monoklinik
Sertlik (mohs)	5.5
Yoğunluk (g/cm^3)	2.91
Renk	Gri beyaz, beyaz
Parlaklık	İpeksi

- **Kotoit ($Mg_3B_2O_6$)**

Kore'nin Suan bölgesine yakın Hol Kol madeninde bulunan nadir bir bor mineralidir. Adını, 1856-1935 yılları arasında yaşamış ve Japon jeolojinin öncülerinden biri olarak kabul edilen Bundjiro Koto'dan almıştır [116].

Katoit (Şekil 3.6) mineralinin fiziksel özellikleri Tablo 3.7'de verilmektedir.



Şekil 3.6 Katoit [117

Tablo 3.24 Katoit fiziksel özellikleri [116]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$Mg_3B_2O_6$
Kristal Sistemi	Ortorombik
Sertlik (mohs)	6.5
Yoğunluk (g/cm^3)	3.04
Renk ve şeffaflık	renksiz, beyaz, şeffaf
Parlaklık	Camsı

3.1.3 Klor İçerikli Magnezyum Boratlar

- **Borasit ($Mg_3B_7O_{13}Cl$)**

Adını bor içeren bileşimden almıştır. Borasit (Şekil 3.7) , sert kristaller veya yumuşak beyaz kütleler halinde bulunan bir sodyum borat mineralidir. Yatak halinde oluşabilir veya jips ve anhidrit yataklarında da bulunabilir [118]. Suda çözünmez olup özellikleri Tablo 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.7 Borasit [119]

Tablo 3.25 Borasit fiziksel özellikleri [119]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$Mg_3B_7O_{13}Cl$
Kristal Sistemi	Ortorombik
Sertlik (mohs)	7-7.5
Yoğunluk (g/cm^3)	2.9
Renk	Mavi yeşil, Renksiz, Gri, Sarı, beyaz.
Şeffaflık	Yarı saydam

- **Shabinit ($Mg_5(BO_3)(Cl,OH)_2.4H_2O$)**

Kar beyazı rengi ile dikkat çeken bu mineral ipek parlaklığına sahiptir. 1980 yılında bulunmuştur. Shabinit (Şekil 3.8) mineraline Rusya'da rastlanmaktadır [120].



Şekil 3.8 Shabinit [121]

Fiziksel özellikleri Tablo 3.9'da verilmektedir.

Tablo 3.26 Shabinit fiziksel özellikleri [121]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$Mg_5(BO_3)(Cl,OH)_2.4H_2O$
Kristal Sistemi	Monoklinik
Sertlik (mohs)	3
Yoğunluk (g/cm^3)	2.32
Renk ve şeffaflık	karbeyaz, şeffaf
Parlaklık	İpeksi

- **Karlit ($Mg_7(BO_3)_3(OH,Cl)_5$)**

Karlit (Şekil 3.9), adını Almanya'nın Kiel kentindeki Christian Albrechts Üniversitesi'nde mineraloji ve petrografi profesörü Franz Karl'ın (1918-1972) Doğu Alpler'in jeolojisine ilişkin çalışmalarından dolayı onuruna almıştır. 1981 yılında keşfedilen bu mineral günümüzde Fransa'da bulunmaktadır [122]. Karlit mineralinin özellikleri Tablo 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.9 Karlit [123]

Tablo 3.27 Karlit fiziksel özellikleri [123]

Fiziksel Özellikler	
Kimyasal	$Mg_7(BO_3)_3(OH,Cl)_5$
Kristal Sistemi	Ortorombik
Sertlik (mohs)	5.5
Yoğunluk (g/cm^3)	2.85
Renk ve şeffaflık	Beyazdan açık yeşile, yarı saydam
Parlaklık	İpeksi

3.2 Üretim Yöntemleri

Türkiye, bor madenleri bakımından oldukça zengin bir ülkedir. Bor, geniş kullanım alanının yanı sıra yüksek cevher kalitesine de sahip olduğundan, ülkemiz ekonomisi için stratejik öneme sahiptir. Buna rağmen, bor madenlerimizden elde edilen hammadde şu an için konsantre ve temel rafine bor bileşikleri dışında katma değerli ürünlere dönüştürülememektedir. Bu durum, bor madeninin potansiyelinin tam olarak değerlendirilememesine neden olmaktadır.

Magnezyum borat bileşikleri, bor madenlerimizden elde edilebilecek katma değerli ürünlerden biridir. Boraks ve magnezyum bileşiklerinin etkinleştirilmesi yoluyla sentezlenen magnezyum borat bileşikleri, yangın geciktirici, yanmaz tekstiller, seramik ve cam üretiminde, gübre ve ilaç üretiminde kullanılabilir.

Magnezyum boratlar, doğada hidroborasit ve szaybelyit gibi mineraller halinde bulunurken, yapay olarak da sentezlenebilen önemli bir bileşik grubudur. $2MgO.3B_2O_3.nH_2O$, $2MgO.B_2O_3.nH_2O$, $MgO.3B_2O_3.nH_2O$ ve $MgO.B_2O_3.nH_2O$, kimyasal yapılarına sahip, yapay magnezyum borat elde etmek mümkündür.

Magnezyum borat sentezi iki şekilde gerçekleştirilebilir. Bazı göllerden elde edilebilen Kloropinnoit ($2MgO.2B_2O_3.MgCl_2.14H_2O$) tuzundan veya magnezyumla bor içeren bileşiklerden sentezlenmesi mümkündür. Bu tuz en fazla Çin'de bulunmaktadır. Bu yüzden, sentezlenmesine yönelik yapılan çalışmaların çoğu bu ülkede gerçekleştirilmektedir.

Kloropinnoit tuzu ile magnezyum borat sentezinde, kloropinnoit tuzu ile doygun çözeltiler hazırlanır. Çözeltiler, sıcaklık ve pH kontrolü altında tutularak kristalleşme işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem sonucunda hidratlı magnezyum borat kristalleri oluşur.

Çöktürme yöntemi ile magnezyum ve bor bileşikleri sulu veya susuz ortamlarda bir araya getirilir. Belirli koşullar altında bu bileşikler etkileşime girerek çökelti oluşturur. Oluşan çökelti, hidratlı magnezyum borattır [124].

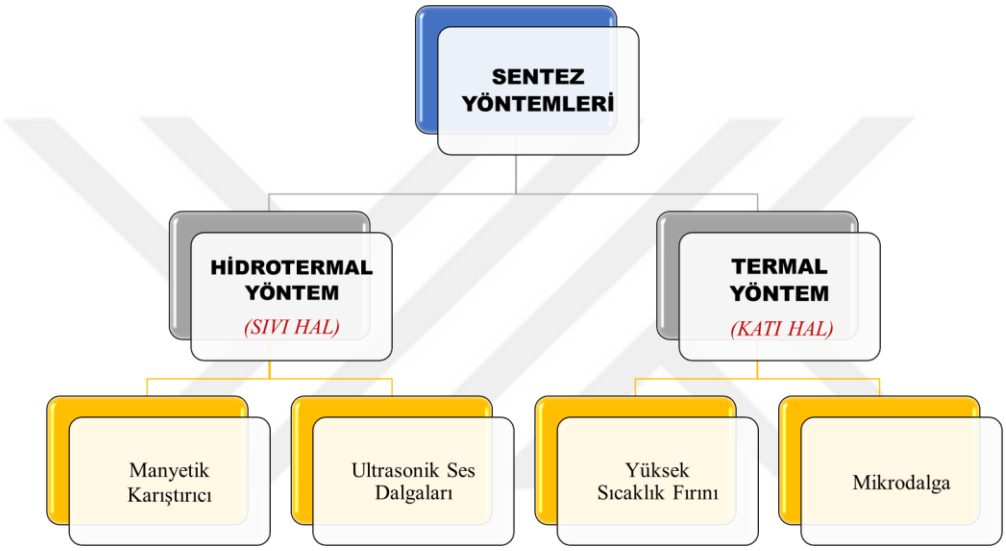
Magnezyum borat iki farklı şekilde yöntem tercih edilerek sentezlenebilmektedir. Bu yöntemler literatürde Termal (katı hal) sentez ve Hidrotermal (sıvı hal) sentezi olarak isimlendirilmektedir.

Hidrotermal (sıvı hal) sentezinin prensibi şu şekildedir:

Magnezyum ve bor kaynakları sıvı bir ortamda ayrı ayrı çözünür ve sıcaklığın etkisiyle bir reaksiyon meydana gelir. Bu işlem sonucunda kristal sulu magnezyum boratlar yani magnezyum borat hidratlar elde edilir.

Katı-Hal (Termal) sentezi ise bor ve magnezyum kaynağı yüksek sıcaklıklı bir fırında hava ortamında reaksiyona sokulur. Bu yöntemle de magnezyum boratlar elde edilebilir.

Magnezyum borat minerallerinin, yapay sentez ile üretim metotlarının sınıflandırması Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10 Magnezyum borat mineralleri üretim yöntemleri

3.2.1 Hidrotermal Yöntem

Jeolojiden ilham alan hidrotermal yöntem, 19. yüzyılın ortalarında mineral ve kaya oluşumunu incelemek için jeologlar tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, tek kristal büyütmede de kullanılmakta ve toz hazırlama teknikleri 200 yılı aşkın süredir geliştirilmektedir [125].

Hidrotermal yöntem, yüksek saflıkta ve iyi tanımlanmış kristal morfolojisine sahip magnezyum borat hidratların sentezi için basit, esnek ve ölçeklenebilir bir yöntem sunar.

Sıvı ortamda ayrı ayrı çözümlenen magnezyum ve bor kaynaklarının, sıcaklık kontrolü altında gerçekleştirilen reaksiyonu ile kristal sulu magnezyum boratlar (magnezyum borat hidratlar) sentezlendiği hidrotermal yöntem, bu bileşiklerin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan bir sentez yöntemidir.

Hidrotermal yöntem iki şekilde gerçekleştirilebilir; manyetik karıştırıcı yardımıyla ya da ultrasonik karıştırıcı yardımıyla yapay olarak magnezyum borat üretimi gerçekleştirilebilir.

Literatürde hidrotermal yöntem kullanılarak magnezyum borat sentezi gerçekleştirilmiş birçok çalışma mevcuttur.

Zhihong ve Mancheng, suyun kaynama noktasında geri beslemeli bir yöntem kullanarak magnezyum borat mineralini sentezlemiş ve ardından kurutmuşlardır.

Kurutma sonrası elde edilen ürün, XRD, FT-IR, Raman ve TG analizleri ile karakterize edilmiş ve bu sayede magnezyum boratın $MgO{\cdot}3B_2O_3{\cdot}3.5H_2O$ formülüne sahip yeni bir kristalografik formu keşfedilmiştir [126].

Sano ve arkadaşları yaptıkları çalışmada magnezyum borür, 25 mol/L sulu NaOH çözeltisi içeren bir otoklavda hidrotermal reaksiyonla kristallerden çapı yaklaşık 5 nm olan nanotüplere dönüştürmüşlerdir. Nanotüp oluşumu için optimum koşulları belirlemek amacıyla reaksiyon süresi ve sıcaklık değiştirmişlerdir. Bu araştırma, yaklaşık 170 °C sıcaklıkta ve 170 saatlik reaksiyon süresinde magnezyum borür nanotüplerinin başarıyla sentezlenebileceğini ortaya çıkarmıştır [127].

Kıpçak ve arkadaşları hidrotermal sentez yoluyla magnezyum borat üretiminde hammadde olan magnezyum atıklarının kullanarak admontit ($MgO(B_2O_3)_3{\cdot}7(H_2O)$) sentezlemişlerdir. Karakterizasyon analizi için XRD, FT-IR, Raman spektroskopisi ve SEM-EDX teknikleri kullanarak ürünlerin bor oksit içerikleri ve toplam verimlerini de hesaplamışlardır. Sonuçlara göre sentezlenen mkallisterit ($Mg_2(B_6O_7(OH)_6)_2{\cdot}9(H_2O)$), magnezyum borat hidrat ($MgB6O7(OH)_6.3(H_2O)$ ve admontit ($MgO(B_2O_3)_3{\cdot}7(H_2O)$) olduğu belirlenmiştir. Magnezyum boratların farklı türdeki magnezyum borat minerallerinin karışımı veya saf magnezyum boratın karışımı olarak elde edilebildiği ispatlanmıştır [128].

Zhu vd. diğer çalışmalarında, hidrotermal yöntem kullanarak 150 litrelik çelik bir otoklavda, $MgCl_2.H_2O$, H_3BO_3 ve NaOH reaktiflerini 200°C'de 12 saat boyunca reaksiyona sokarak yüksek konsantrasyonda $MgBO_2(OH)$ nano kristal flamanları sentezlemeyi başarmıştır. Santrifüjleme işlemiyle karışımdan ayrıştırılan bu nano kristaller, bilimsel araştırmalarda ve çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir. Oluşan ara 23 ürünün termal yolla 700^oC, 6 saat sürede $MgBO_2(OH)$'den monoklinik yapıdaki $Mg_2B_2O_5$ dönüşümünü sağlamıştır [129].

3.2.1.1 Manyetik Karıştırıcı ile Magnezyum Borat Üretimi

Manyetik karıştırma, magnezyum borat sentezinde sıklıkla kullanılan ve sıvı hal üretim yöntemlerinin temelini oluşturan bir yöntemdir. Bu yöntemde, önceden belirlenmiş oranlarda hammaddelerin hazırlanmış bir çözeltiye eklenmesi ve reaksiyon süresi boyunca manyetik karıştırıcı ile ortamda sürekli bir hareketlilik sağlanması ile sentez gerçekleştirilir. Bu sayede hammaddeler arasındaki etkileşimin en üst düzeye çıkarılması ve homojen bir ürün elde edilmesi amaçlanır.

3.2.1.2 Ultrasonik Karıştırıcı ile Magnezyum Borat Üretimi

Ultrasonik yardımlı sentez yönteminde, önceden hazırlanmış hammadde karışımını içeren sulu çözelti bir kaba yerleştirilir. Bu kap, yüksek frekanslı ses dalgaları ile titreştirilen bir sıvı banyosuna daldırılır. Milyonlarca mikroskobik hava kabarcığı oluşturmak için kullanılan ses dalgaları, kabarcıklarda basınç değişimlerine yol açar. Bu basınç değişimleri sonucunda kabarcıklar önce genişler, sonra da aniden patlayarak sıvı ortamda türbülans oluşturur. Oluşan türbülans, hammaddeler arasındaki etkileşimi ve reaksiyon hızını önemli ölçüde artırarak homojen bir ürün elde edilmesini sağlar.

3.2.2 Termal Yöntem

Magnezyum borat sentezinde, önceden homojen hale getirilmiş kuru hammaddeler ısıya maruz bırakılarak reaksiyona sokulur. Bu işlemde, istenen sıcaklık koşullarını sağlayabilen fırınlar en yaygın kullanılan yöntemdir. Fakat geçmiş araştırmalar, mikrodalga fırının da bu sentez için kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

3.2.2.1 Fırın Metodu ile Magnezyum Borat Üretimi

Magnezyum borat sentezinde kullanılan fırın yöntemi, önceden homojen hale getirilmiş hammaddelerin, belirli bir sıcaklık ve zaman aralığında ısıtılarak reaksiyona girmesine dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemde, istenilen bileşimdeki hammadde karışımı, ısıya dayanıklı ve kimyasal reaksiyonlara karşı dirençli bir malzeme olan kroze içerisine yerleştirilir. Kroze daha sonra, belirli bir fırında istenilen sıcaklığa ısıtılır ve bu sıcaklıkta önceden belirlenmiş bir süre boyunca tutulur. Bu süre zarfında, hammaddeler arasındaki kimyasal etkileşimler artar ve magnezyum borat kristalleri oluşur. Reaksiyon süresi ve sıcaklık gibi parametreler, sentezlenen magnezyum boratın morfolojisi, saflığı ve kristal yapısı gibi

özelliklerini etkileyebileceğinden, bu parametrelerin hassas bir şekilde kontrol edilmesi oldukça önemlidir.

3.2.2.2 Mikrodalga Metodu ile Magnezyum Borat Üretimi

Kimyasal işlemlerde ısıtma ve reaksiyon yöntemi olarak mikrodalga fırınlar, basitlikleri, hızları ve çevre dostu olmaları nedeniyle son yıllarda yoğun ilgi görmektedir. Bu yöntem, geleneksel ısıtma yöntemlerine kıyasla daha kısa reaksiyon süreleri sağlayarak zamandan tasarruf ve enerji verimliliği sunar. Mikrodalga fırınlar, hammaddelerin daha küçük tanecik boyutlarına ve dar tanecik boyut dağılımına sahip olmalarını teşvik ederek nano boyutlu materyal sentezinde de önemli bir rol oynar. Bu özellik, üretilen nano materyallerin performanslarını ve işlevlerini önemli ölçüde artırabilir. Mikrodalga fırınların kimyasal sentezlerde sunduğu diğer avantajlar arasında yüksek saflık, homojenlik ve kontrollü ısı dağılımı yer alır. Bu özellikler, hassas ve yüksek kaliteli ürünlerin üretilmesine olanak tanır.

4
ATIK SU

4.1 Atık Sular

Evsel atıklar, endüstriyel tesisler, tarımsal faaliyetler ve diğer insan kaynaklı girişimler sonucu özelliklerini kaybeden veya kirlenen sular, "kirli sular" olarak adlandırılır. Maden ocaklarından ve cevher işleme tesislerinden atılan sular, yapılaşmış, kaplanmış veya kaplanmamış alanlardan, caddelerden, otoparklardan ve benzeri yerlerden yağışların yüzey veya yeraltı sularına karışması sonucu oluşan sular da kirli sular kategorisine girmektedir.

Tarımsal sulama, evsel atıklar ve sanayi üretiminden kaynaklanan atık sular, insan ve çevre sağlığı için tehlikeli olabilecek birçok zararlı maddeyi içerir. Bu kirleticiler arasında endüstriyel boyalar, ilaçlar ve ağır metaller gibi maddeler bulunur. Atık suyun arıtılması ve zararsız hale getirilmesi, çevre kirliliğini önlemek için son derece önemlidir. Bu nedenle, su arıtma teknolojileri ve yöntemleri üzerinde araştırmalar ve geliştirmeler sürekli olarak yapılmaktadır.

Su kirleticileri, organik ve inorganik maddeler, mikroorganizmalar, askıda katı maddeler, besin maddeleri, tarımsal kimyasallar, ısı ve radyoaktif maddeler gibi kategorilere ayrılabilir. Organik ve inorganik kirleticiler, endüstriyel atık sular ve kanalizasyon yoluyla su kaynaklarına taşınır [130].

4.1.1 Evsel Atık Su

Evlerde ve konutlarda günlük yaşamın bir parçası olarak oluşan atık sular, "evsel atık sular" olarak adlandırılır. Bu atık sular, tuvaletler, çamaşırhaneler ve banyolar gibi tesisatlardan akan sıvı atıklar ve yemek pişirme gibi diğer evsel faaliyetlerden kaynaklanan atık sular olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir [131].

Evsel atıksular, kirlilik türü ve kaynağına göre siyah, gri ve sarı olarak üç gruba ayrılır. Bu renk kodlaması, atıksuların arıtma ve yönetim süreçlerinde önemli bir rol oynar [132].

4.1.2 Tarımsal Atık Su

Tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan yüzey akışı, birçok havzada önemli bir su kirliliği sorunu teşkil etmektedir. Bu akış, tarlalarda sulama işlemi sırasında fazla suyun topraktan taşması sonucu oluşur ve "sulama kuyruk suyu" olarak da bilinir [133].

Tarlalardan aşırı miktarda akan bu su, yakındaki su kaynaklarına tortu ve besin taşınmasının ana sebebidir. Bu suyla birlikte gübreler, böcek öldürücüler, yabani ot öldürücüler, bitki artıkları, hayvan dışkıları, domuz, kümes hayvanı ve balık çiftliği atık suları ve süt hayvancılığı atıkları gibi tarımsal kimyasallar da su kaynaklarına taşınarak kirliliğe yol açar [134].

Tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan atık suların neden olduğu kirliliği önlemek için, birçok çiftlik, yüzey akışını önemli ölçüde azaltmaya yönelik farklı yönetim teknikleri kullanmaktadır [135, 136].

4.1.3 Endüstriyel Atık Su

Farklı üretim, temizlik ve ticari faaliyetlerden kaynaklanan, çözünmüş ve askıda katı maddeler içeren atık sulara "endüstriyel atık su" adı verilir. Bu sular, fabrikalar, atölyeler ve diğer işletmeler tarafından deşarj edilir ve çevreye zarar verebilecek birçok kirleticiyi içerir [137].

Farklı sektörlerde faaliyet gösteren fabrikalar tarafından üretilen atık sularda bulunan kirleticiler, bu sektörlerin türüne göre değişkenlik gösterir. Madencilik, çelik/demir üretimi, tekstil, enerji santralleri, petrol ve gaz çıkarma, metal işleme ve gıda/içecek işleme gibi sektörler, önemli atık su üreten sektörlere örnek olarak verilebilir [138].

Farklı fabrikalardan atılan atık sularda, kimyasallar, ağır metaller, yağlar, böcek ilaçları, tortu, ilaçlar ve diğer endüstriyel yan ürünler gibi birçok kirletici madde bulunur [139].

Farklı endüstrilerin kendine özgü atık su türleri ve kirleticileri olduğundan, genel bir arıtma yöntemi uygulamak yerine her bir tesisin ve arıtma tesisinin ayrı ayrı

değerlendirilmesi gerekir. Bu karmaşıklığı göz önünde bulundurarak, atık suları arıtmak için filtre presleri gibi arıtma sistemleri kurulum yerinde gerçekleştirilir [140].

Farklı endüstriyel atık suların arıtılması için fiziksel, kimyasal ve biyolojik olmak üzere üç temel yöntem kullanılır. Kimyasal arıtmada, atık suya farklı kimyasallar eklenerek hızlı veya yavaş karıştırma işlemi uygulanır. Bu kimyasallar, kirleticilerle reaksiyona girerek onları çökeltir. Kimyasal ve farmasötik üretimden kaynaklanan atık sular, genellikle biyolojik arıtma işleminden geçtikten sonra su kütlelerine deşarj edilmeden önce arıtılır. Bu arıtma işlemi, merkezi bir arıtma tesisinden önce, üretim sahasına yakın bir konumda, seçilen atık su akışlarında yapılabilir.

4.2 Atık Su Arıtma Yöntemleri

Atıksu arıtma işleminin temel amacı, arıtılmış suyun deşarj edildiği çevrede insan sağlığını ve doğal dengeyi korumaktır. Bu amaca ulaşmak için atıksu arıtma tesislerinde bir dizi aşama gerçekleştirilir.

- Katı maddelerin uzaklaştırılarak suyun berraklaştırılması.
- Ağır metaller ve toksik bileşiklerin kimyasal arıtma yöntemleriyle giderilmesi.
- Organik maddelerin biyolojik arıtma ile parçalanarak sudan uzaklaştırılması.
- Alıcı ortamın durumuna bağlı olarak azot ve fosforun ileri arıtma yöntemleriyle giderilmesi.

Farklı türdeki atık sularda bulunan boyaların renk giderimi için tek tip bir yöntem kullanılamaz. Renk giderimi için kullanılan yöntem, atık suyun türüne göre değişiklik gösterir. Bu yöntemler kimyasal, fiziksel ve biyolojik yöntemler olarak üç ana gruba ayrılabilir. Atık suyun türüne ve özelliklerine bağlı olarak hangi arıtma işleminin uygulanacağı da değişir.

Biyolojik arıtma: Çözünmüş organik maddeler, mikroorganizmalar tarafından parçalanarak giderilir.

Kimyasal arıtma: Çözünmüş veya askıda kalan maddeler, kimyasallar ile çökeltilir ve sudan ayrılır.

Fiziksel arıtma: Kendiliğinden çökebilen katı maddeler, çeşitli fiziksel yöntemler ile atıksudan ayrılır.

4.2.1 Fiziksel Arıtma Prosesleri

Atıksu arıtma tesislerinde, ilk aşamada fiziksel arıtma yöntemi kullanılarak sudan yüzen ve kendiliğinden çökebilen katı maddeler ayrılır. Bu işlem için ızgara, elek, kum ve yağ tutucu gibi ekipmanlar kullanılır. Biyolojik veya kimyasal arıtma tesislerinden önce fiziksel arıtma tesisleri kurmak yaygındır. Bu sayede atıksudaki kirleticilerin önemli bir kısmı önceden giderilerek ana arıtma sisteminin yükü hafifletilir. Fiziksel arıtma tesisi, ana arıtma sistemine gelen kirlilik yükünü azaltarak, ekipmanları koruyarak ve işletme maliyetlerini düşürerek önemli faydalar sağlar. Atıksu arıtımında en yaygın kullanılan fiziksel arıtma yöntemleri Fiziksel arıtma yöntemleri Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Fiziksel arıtma yöntemleri

4.2.2 Biyolojik Arıtma Prosesleri

Atıksuların %99'undan fazlası sudan oluşur ve kalan kısmı ise kirleticilerdir. Kirleticiler suda çözünmüş veya katı madde olarak askıda bulunabilir. Bu maddelerin türlerine göre arıtma yöntemleri de değişir. Organik kirleticilerin giderilmesinde en etkili yöntem "biyolojik arıtma" yöntemidir.

Biyolojik arıtma işleminde, atıksudaki askıda veya çözünmüş organik maddeler bakteriler tarafından parçalanır ve çökebilen biyolojik floklar halinde sıvıdan ayrılır. Bu floklar, suda kalan veya atmosfere gaz olarak salınan sabit inorganik bileşiklere dönüşür. Biyolojik arıtmanın temel prensibi, doğada var olan biyoflokülasyon ve mineralizasyon süreçlerini kontrol altına alarak ve optimum koşullarda tekrarlamaktır.

Biyolojik arıtma, atıksudaki kirleticileri mikroorganizmaların yardımıyla gidermeyi amaçlayan bir yöntemdir. Bu yöntemin temel hedefleri şunlardır:

Çökelmeyen Kolloidal Katıların Giderilmesi: Atıksudaki kolloidal katılar, pıhtılaştırma işlemiyle birleştirilerek çökeltiye dönüştürülür ve sudan ayrılır.

Organik Maddelerin Kararlı Hale Getirilmesi: Biyolojik arıtma, organik maddeleri mikroorganizmaların kullanabileceği basit moleküllere dönüştürülerek, organik atıklar doğaya zarar vermeden yok edilir.

Besin Maddelerinin Giderilmesi: Azot ve fosfor gibi besin maddeleri, biyolojik arıtma ile giderilir. Bu besin maddeleri, su kaynaklarının kirlenmesine yol açabileceğinden önemlidir.

Eser Miktardaki Organik Maddelerin Giderilmesi: Biyolojik arıtma, düşük konsantrasyondaki organik maddeleri giderir ve suyun temizlenmesini sağlar.

Azot ve Fosforun Arıtılması: Tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan atıksularda azot ve fosforun arıtılması kritik önem taşır. Bu besin maddeleri, su kaynaklarının kirlenmesine ve aşırı yosun oluşumuna yol açabilir.

Organik ve İnorganik Bileşiklerin Arıtılması: Endüstriyel atıksularda bulunan organik ve inorganik bileşikler, biyolojik arıtma ile giderilir.

Tekstil endüstrisi atık suları, yüksek kirletici içerikleri ile çevreye önemli zararlar verebilir. Bu atık sularda bulunan boyalar ve kimyasallar, su kaynaklarını kirletebilir ve canlı yaşamına zarar verebilir. Biyolojik arıtma yöntemi, tekstil atık sularının arıtılmasında oldukça etkili ve ekonomik bir çözüm sunar [141].

Biyolojik arıtma yöntemleri Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Biyolojik arıtma prosesleri

4.2.3 Kimyasal Arıtma Prosesleri

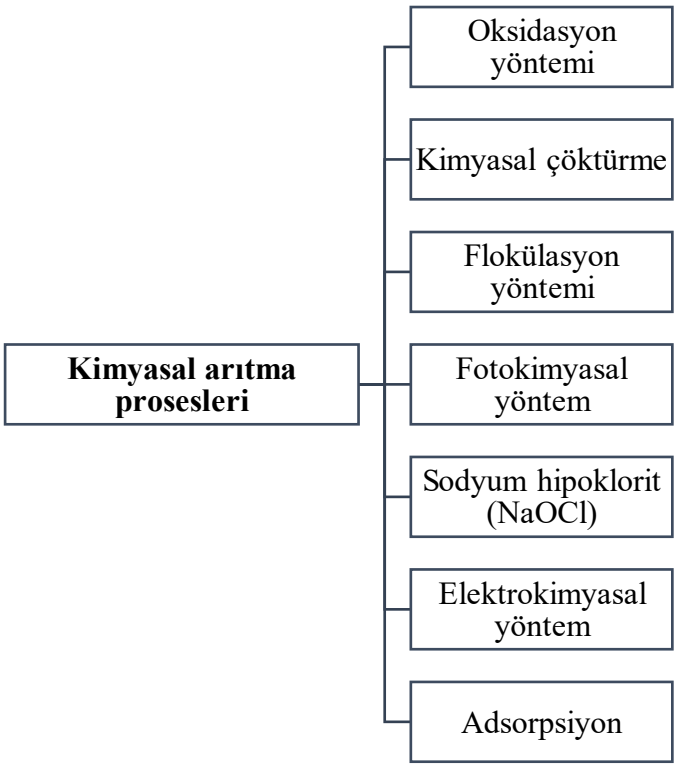
Kimyasal arıtma tesislerinde, suda çözünmüş ve askıda kalan katı maddelerin çökelmesi ve bertarafı için özel bir yöntem uygulanır. Bu yöntemde, atıksuya uygun pH aralığında kimyasal maddeler eklenerek çökelme sağlanır. Bu kimyasal maddeler, koagülant olarak adlandırılır ve çökelme işlemini gerçekleştirirler.

Nötralizasyon Bölümü: Atık suyun pH değeri, koagülantın etkili bir şekilde çalışabilmesi için uygun aralığa (genellikle nötr veya hafif alkali) getirilir.

Koagülasyon Bölümü: Koagülant, atık suya eklenerek, suda çözünmüş ve askıda bulunan katı maddelerin bir araya gelerek daha büyük kümeler oluşturmasına yardımcı olur.

Flokülasyon Bölümü: Koagülant ilave edilmiş atık suyun yavaş ve kontrollü bir şekilde karıştırılmasıyla flokların boyutu büyütülür ve çökelmeye hazır hale getirilir.

Bu üç ünitede gerçekleştirilen işlemler sonucunda, atık sudaki katı maddeler çöker ve sudan ayrılır. Çöken katı maddeler arıtma tesisinden bertaraf edilirken, arıtılmış su ise doğaya deşarj edilir veya tekrar kullanılabilir hale getirilir [142]. Atık suyun arıtımında yaygın olarak tercih edilen kimyasal yöntemler Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3 Kimyasal arıtma prosesleri

4.2.3.1 Fotokimyasal Yöntem

UV/H_2O_2 oksidasyonu yöntemi, boya moleküllerini parçalamada oldukça etkili bir yöntemdir. Bu yöntemde, hidrojen peroksit (H_2O_2) varlığında UV radyasyonu kullanılarak boya molekülleri CO_2 ve H_2O'ya dönüştürülür.

Parçalanma işlemi, yüksek konsantrasyonlarda hidroksil radikallerinin oluşmasıyla gerçekleşir. UV ışığı, hidrojen peroksitin iki hidroksil radikaline parçalanmasını sağlayarak bu radikallerin oluşmasına katkıda bulunur. Hidroksil radikalleri oldukça reaktif moleküllerdir ve boya moleküllerine saldırarak onları daha küçük parçalara ayırır. Bu küçük parçalar, daha sonra CO_2 ve H_2O'ya dönüştürülür. Eşitlik 4.1'de reaksiyon verilmektedir.

$$H_2O_2 + hv \rightarrow 2OH- \quad (4.1)$$

Boya gideriminin hızı, UV radyasyonunun şiddetinden, ortamın pH değerinden, boyar maddenin kimyasal yapısından ve boya banyosunun bileşiminden etkilenmektedir [143].

Ortamın pH değeri, ideal olarak 7 civarında olmalıdır. Bu pH aralığında, hidroksil radikallerinin oluşumu en üst düzeye ulaşır ve boya moleküllerinin parçalanması en hızlı şekilde gerçekleşir. UV radyasyonunun şiddeti ne kadar yüksekse, boya moleküllerinin parçalanması o kadar hızlı gerçekleşir ve renk giderimi daha etkili olur [144].

4.3 Kongo Kırmızısı Gideriminde Kullanılan Atık Su Arıtma Yöntemleri

Aromatik bir amin içeren Kongo Kırmızısı, diazo boya grubunda yer alan ve doğal süreçlerle kolayca bozulmayan bir bileşiktir. Bu yüksek kararlılık, ekosistemdeki tüm canlılar için zararlı etkiler doğurmaktadır.

Kongo kırmızısı gideriminde koagülasyon veya flokülasyon [145], biyolojik tedavi [146], kimyasal oksidasyon [147], adsorpsiyon [148, 149], membran filtrasyonu [150] ve elektrokimyasal yöntemler [151] gibi birçok işlem uygulanmaktadır.

5
BOYAR MADDE

5.1 Boyar Madde

Cisimleri renklendirmek için kullanılan maddelere boya maddesi denir. Fakat renk veren veya renkli olan her madde boya maddesi olarak kabul edilemez. Boyarmaddeler, boyalardan farklı olarak genellikle çözelti veya süspansiyon formunda uygulanır ve organik bileşiklerden oluşur.

Boyarmaddeler, boyanan cismin yüzeyi ile kimyasal veya fizikokimyasal bağlar oluşturarak kalıcı bir birleşme sağlar. Bu sayede, boyanan yüzey kazıma, silme gibi işlemlere karşı dayanıklı hale gelir ve orijinal rengini uzun süre korur.

Boyarmaddelerin Farklı Özellikleri:

- Boyarmaddeler, suda çözünür veya çözünmez olabilirler. Suda çözünen boyarmaddeler, tekstil ve deri gibi doğal ürünlerin boyanmasında kullanılır. Suda çözünmeyen boyarmaddeler ise plastik ve kağıt gibi malzemelerin boyanmasında kullanılır.
- Boyarmaddeler, ışığa karşı dayanıklı veya dayanıklı olmayan olabilirler. Işığa dayanıklı boyarmaddeler, solmaya karşı dirençlidir ve uzun süre kalıcı renkler sağlar. Işığa dayanıklı olmayan boyarmaddeler ise zamanla solma ve renk değişimi gösterebilir.
- Boyarmaddeler, ısıya karşı dayanıklı veya dayanıklı olmayan olabilirler. Isıya dayanıklı boyarmaddeler, yüksek sıcaklıklara maruz kalma durumunda bile renklerini korur. Isıya dayanıklı olmayan boyarmaddeler ise yüksek sıcaklıklarda renk değişimi veya solma gösterebilir.

Boyalar, yapılarına göre farklı kategorilere ayrılır:

Anyonik boyalar, molekül yapılarında negatif yüklü iyonlar barındıran boyalardır. Bu özelliklerinden dolayı, suda çözünürlükleri yüksektir ve tekstil, deri ve kağıt gibi doğal ürünlerin boyanmasında kullanılırlar. Katyonik boyalar ise molekül yapılarında pozitif yüklü iyonlar barındıran boyalardır. Bu nedenle suda çözünürlükleri düşük olsa da, plastik ve sentetik lifler gibi malzemelere iyi yapışırlar. Azo boyalar, azot-azot çift bağı içeren ve geniş bir renk yelpazesi sunan boyalardır. Dayanıklılıkları ve düşük maliyetleri sayesinde plastik, kauçuk ve kozmetik ürünlerinde yaygın olarak kullanılırlar [152].

5.1.1 Kongo Kırmızısı

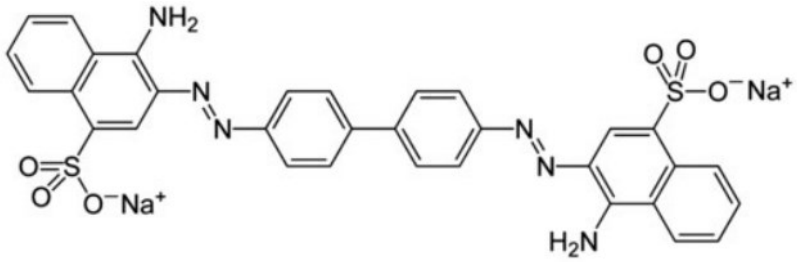
Kongo Kırmızısı, tekstil ve deri boyama gibi birçok alanda kullanılan ilk doğrudan boya olarak tarihe geçmiştir. Bu önemli keşif, 1883 yılında Almanya'nın Ebersfeld kentinde yer alan Friedrich Bayer Company'de görev yapan boya kimyacısı Paul Bottinger tarafından gerçekleştirilmiştir [153].

Kongo kırmızısı, oldukça kararlı ve karmaşık bir yapıya sahip olan diazo boyaları kategorisine girer. Bu karmaşık yapı, Kongo Kırmızısı' nın biyolojik olarak parçalanmasını zorlaştırır ve onu doğada kalıcı hale getirir.

Suda yüksek çözünürlüğü, bu boyanın çevreye kolayca yayılmasına ve su kirliliğinin önemli bir kaynağı olmasına yol açar. Su arıtma tesislerinde bile Kongo Kırmızısı' ndan tamamen arınmak oldukça zordur. Bu durum, su kaynaklarının kirlenmesi ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır.

Kongo Kırmızısı' nın tehlikeli özelliği ise kanserojen olmasıdır. Cilt, göz, üreme sistemi ve solunum sistemi üzerinde tahribat yaratabilir. Uzun süreli maruz kalma, bu organlarda ciddi hasarlara ve hatta ölümcül sonuçlara yol açabilir. Bu nedenlerden dolayı, Kongo Kırmızısı' nın kullanımı birçok ülkede yasaklanmış veya kısıtlanmıştır [154].

Kongo Kırmızısı, bis-diazotize edilmiş benzidinin iki naftiyonik asit molekülü ile birleştirilmesiyle sentezlenir [155]. Bu şekilde elde edilen mavi boya, sodyum klorür ile tuzlanması sırasında kırmızı disodyum tuzuna dönüştürülür. Kongo Kırmızısı molekül yapısı Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 Kongo Kırmızısı molekül yapısı [156]

1996 yılında yürürlüğe giren bazı azo boyalarının kullanımını yasaklayan Alman Tüketim Malları Yönetmeliği (1994), doğrudan boyaların kullanımını ciddi şekilde kısıtlamıştır. Kongo Kırmızısı da dahil olmak üzere benzidinden türetilen bazı biazo boyalarının kanserojen etkisi vardır. Bu nedenle Kongo Kırmızısı, küresel olarak birçok boyarmadde üreticisinin üretim yelpazesinden çekilmiştir [157].

Kongo kırmızısı gibi boyaların mevcudiyeti karaciğeri, cildi ve DNA'yı olumsuz etkileyerek aktif toksik eklentiler oluşturarak ciddi sağlık sorunlarına neden olur [158].

Kongo kırmızısı boyası, asidik ortamda adsorpsiyonu artan ve dolayısıyla asidik ortamda bozunma etkinliği artan anyonik bir boyadır [159].

Kongo kırmızısı yün, ipek, tekstil ve gıda endüstrilerinde kullanılmaktadır [160].

Kongo kırmızısı gibi boyalar tekstil, kimya, ilaç, kağıt ve kozmetik sektörleri gibi çok sayıda endüstride kullanılmaktadır. Sonuç olarak, bu bileşiklerin önemli bir miktarı suyu kirletir ve normal su temellerine girer. Bu bileşiklerin bileşiminde bulunan aromatik aminler nedeniyle bu boyaların yutulması kansere neden olabilir. Bu nedenle çevresel kurallar, işletmelerin bu zararlı bileşikleri çevreye salmadan önce kirli endüstriyel sıvılardan uzaklaştırmasını zorunlu kılar [161].

6
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan malzemeler; magnezyum borat üretimi için magnezyum oksit (MgO) kaynağı Merck'den satın alınmıştır. Bor kaynağı olan (H_3BO_3) borik asit ise Etibank Bandırma Bor ve Asit Fabrikasından elde edilmiştir.

Moleküler ağırlığı 696.68 g/mol olan kırmızı kristal bir toz olan Kongo Kırmızısı boya maddesi AFG Bioscience' dan temin edilmiştir. Kullanılan Kongo Kırmızısı boyar maddesi Şekil 6.1' de verilmiştir.



Şekil 6.2 Deneylerde kullanılan Kongo Kırmızısı boyar maddesi

Etanol (C_2H_5OH) Honeywell' den satın alınmıştır. Deneylerde kullanılan saf su, "Gesellschaft für Labortechnik (GFL) 2004" marka su arıtma sisteminden sağlanmıştır. Hammaddeler, herhangi bir ön işlem uygulanmadan kullanılmıştır.

Kapayıcı ajan olarak; Oleik Asit (OA, $C_{18}H_{34}O_2$ minumum %90 saflıkta) Sigma Aldrich'ten, Setil-trimetil-amonyum bromit (CTAB, $C_{19}H_{42}BrN$ minumum %99

saflıkta) ve Polivinilpirolidon (PVP, $(C_6H_9NO)_n$ minumum %99 saflıkta) Merck'ten satın alınmıştır.

6.2 Üretim Yöntemi

Magnezyum borat mineralleri, manyetik karıştırıcılar ile desteklenen hidrotermal yöntemle üretimi gerçekleştirilmiştir.

Hidrotermal yol, tek tip bir bileşime sahip düzgün ve ince dağılmış partikülleri doğrudan üretmek için kullanılmıştır. Homojen bir görünüm elde edilerek aglomerasyon önlenmiştir.

Magnezyum borat üretimi manyetik ısıtıcı plakalı karıştırıcı yardımıyla belirli miktarlarda magnezyum ve bor kaynakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Manyetik karıştırıcı için kullanılan cihaz Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.3 Manyetik karıştırıcı sistemi

Magnezyum borat üretimi için ilk aşamada katkısız üretim gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada kapayıcı ajan katkılı üretim denemeleri yapılmıştır. Deneylerde uygulanan hidrotermal, manyetik karıştırma yönteminde bütün denemelerin (Mg:B) 1:6 mol oranında yapılmasına karar verilmiştir. Tartılan hammaddeler 50 ml saf su içerisinde çözülmüştür.

Tüm deneyler, 3 saat boyunca 500 rpm hızda ve 100°C sıcaklıkta reaksiyon gerçekleştirilmiştir. Deneyler kapalı bir kap içerisinde gerçekleştirilirken tepkime sıcaklıkları sıcaklık kontrol ünitesi ile sabit tutulmuştur. Magnezyum borat sentezine yönelik deneysel parametreler Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.28 Magnezyum borat sentezi için deneysel parametreler

Mg/B Molar Oranı	Sıcaklık (°C)	Karıştırma hızı (rpm)	Reaksiyon süresi (saat)	Kurutma sıcaklığı (°C)
1:6	100	500	3	40

Reaksiyon süresinin sonunda reaksiyon kabındaki ürünler soğumaya bırakılmıştır. Elde edilen parçacıkların uzaklaştırılması için ürünler 90 mm boyutuna sahip filtre kağıdından süzülmüştür ve vakumlu süzme işlemi uygulanarak, etanol ile yıkama işlemine tabii tutulmuştur. Hidrotermal reaksiyon sonrası ürün yıkama vakum filtrasyon işlemi Şekil 6.3'te verilmiştir.



(a) Vakum filtrasyon işlemi **(b)** Ürün yıkama işlemi

Şekil 6.4 Hidrotermal reaksiyon sonrası ürün yıkama vakum filtrasyon işlemi

Yıkama sonrası elde edilen ürünler yaklaşık 24 saat boyunca 40 °C sıcaklıkta Ecocell markalı etüv içerisinde dehidre edilmiş ve numuneler analize hazır hale getirilmiştir. Kullanılan etüv Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.5 Ecocell marka etüv

Kapayıcı ajan katkılı ve katkısız magnezyum borat üretim aşamaları aşağıda verilmiştir:

6.2.1 Katkısız Üretim

Üretim sırasında borik asit (H_3BO_3) minerali 50 ml distile su içerisinde çözülmüştür. Çözelti belirlenen 100°C sıcaklığa kadar ısıtılarak magnezyum kaynağı olan magnezyum oksit (MgO) ilave edilmiştir ve reaksiyon 100°C' de, 3 saat boyunca, 500 rpm karıştırma hızında, manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Deneyler kapalı bir kap içerisinde gerçekleştirilirken, sıcaklık kontrol ünitesi ile reaksiyon sıcaklıkları sabit tutulmuştur.

Reaksiyon tamamlandıktan sonra reaksiyon kabındaki ürünler soğumaya bırakılmıştır. Numuneler etanol ile iyice yıkanmış ve vakumlu filtrasyon işlemi uygulanarak reaksiyona girmemiş borik asitten ayrıştırılmıştır. Daha sonra yaklaşık 24 saat boyunca 40°C'deki bir etüvde kurutulmuştur.

6.2.2 Kapayıcı Ajan Katkılı Üretim

Üretim sırasında borik asit (H_3BO_3) minerali 50 ml distile su içerisinde çözülmüştür. Çözelti içerisine kullanılan kapayıcı ajanlar sırasıyla Oleik Asit, CTAB ve PVP' dir. Her bir deneme için bir kapayıcı ajan kullanılmıştır. Bu sayede kapayıcı ajan katkılı farklı ürünler elde edilmiştir.

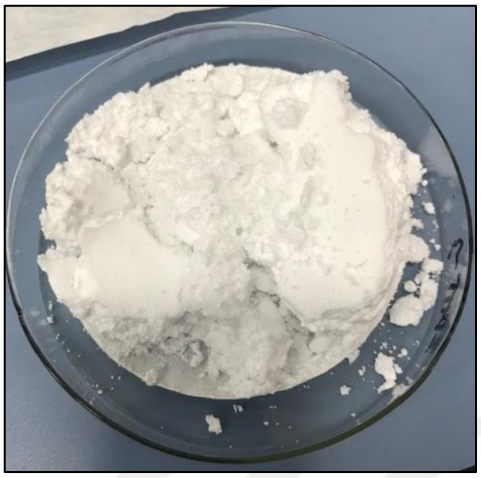
Kapayıcı ajanlar çözelti içerisine farklı oranlarda eklenmiştir;

- PVP sıvı bir kapayıcı ajan olup, hazırlanan çözelti içerisine 1 ml ilave edilmiştir.
- Oleik asitten 1 ml alınarak, 5 ml bütanol içerisinde çözündürüldükten sonra hazırlanan çözelti içerisine ilave edilmiştir.
- CTAB (Setil-trimetil-amonyum bromit) katı bir yapıya sahip kapayıcı ajandır. 0.1 g CTAB tartılarak 10 ml bütanol içerisinde çözündürüldükten sonra, esas çözelti içerisine 5 ml ilave edilmiştir.

Çözeltiler belirlenen 100°C sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra magnezyum oksit (MgO) ilave edilmiştir. 100°C sıcaklıkta sabit tutularak, 3 saat boyunca 500 rpm hızda reaksiyon gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon tamamlandıktan sonra reaktörler soğumaya bırakılmıştır. Vakumla süzme işlemi uygulanarak, etanol ile yıkama

işlemi gerçekleştirilmiştir. Yıkama sonrası elde edilen ürünler, 24 saat boyunca 40°C'deki bir etüvde kurutulmuştur.

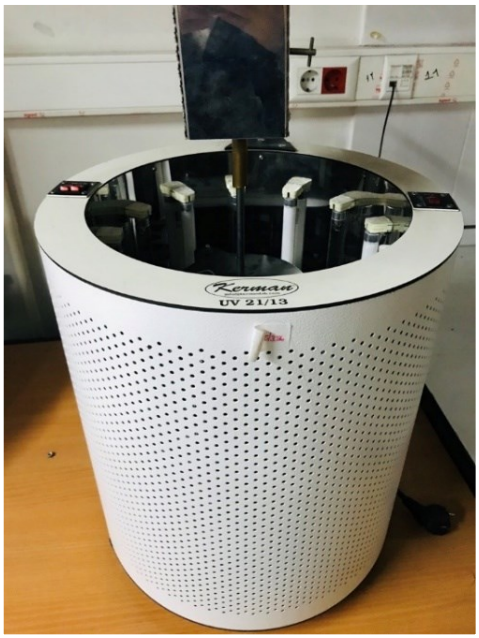
Üretilen magnezyum borat tozlarının bir örneği Şekil 6.5'te gösterilmektedir.



Şekil 6.6 Kurutulduktan sonra magnezyum borat örneği

6.3 Boya Çözeltilerinin Hazırlanması ve Fotobozunma İşlemi

Boyanın fotobozunma için Kongo Kırmızısı sulu boya çözeltileri 50 mg/L konsantrasyonda hazırlanmıştır. Boya çözeltilerinden 5 ml alınarak kuvars tüplere aktarılmıştır. 0,01, 0,03, 0,05, 0,07 ve 0,09 g magnezyum borat kuvars tüp içerisine tartılarak Kerman UV 21/13 marka UV reaktöründe (Şekil 6.6) 15 dakika bekletilmiştir.



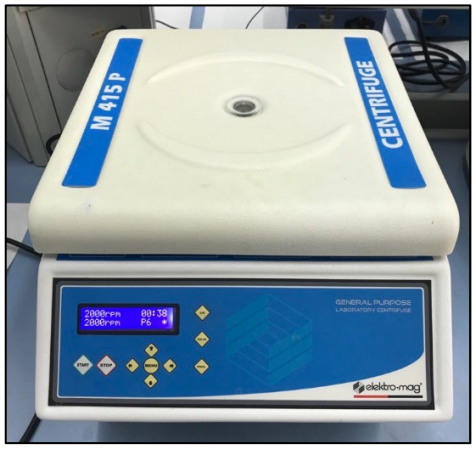
Şekil 6.7 Kerman UV 21/13 marka UV reaktör

Kütle, temas süresi ve başlangıç konsantrasyonu gibi reaksiyon parametrelerinin KK boyasının magnezyum borat ile giderimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu parametrelerin çalışma aralıkları literatür eşliğinde belirlendikten sonra bilgisayar destekli deney tasarım programı yardımıyla tepki yüzey yöntemi (RSM) kullanılarak deney setleri oluşturulmuştur (Tablo 6.2).

Tablo 6.29 Kongo Kırmızısı boyası-RSM için deneysel parametreler

Faktör 1 **A: Kütle (g)**	**Faktör 2** **B: Zaman (dk)**	**Faktör 3** **C: Başlangıç konsantrasyon (ppm)**
0.06	32.50	30.00
0.10	32.50	50.00
0.06	60.00	50.00
0.06	60.00	10.00
0.01	60.00	30.00
0.01	32.50	50.00
0.10	5.00	30.00
0.06	5.00	50.00
0.01	5.00	30.00
0.10	32.50	10.00
0.06	5.00	10.00
0.10	60.00	30.00
0.01	32.50	10.00

Fotobozunma tamamlandıktan sonra, sıvı fazı katı parçacıklardan ayırmak için çözeltiler santrifüj işlemine tabi tutulmuştur. Santrifüj işlemi için Elektromag M415 P Genel Amaçlı Santrifüj markalı cihaz kullanılmıştır (Şekil 6.7). Santrifüj işlemi 2000 rpm'de 8 dakika olarak uygulanmıştır.

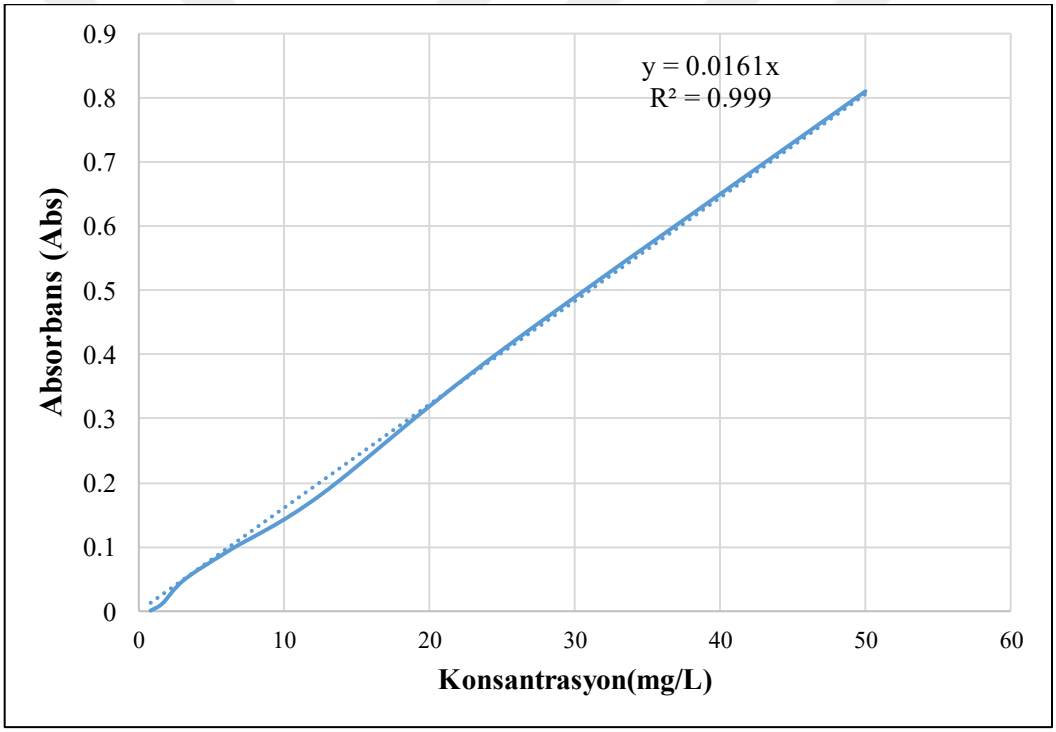


Şekil 6.8 Elektromag M415 P Genel Amaçlı Santrifüj

Elde edilen sıvı fazların konsantrasyonları, UV vis spektrofotometre cihazında KK boya maddesinin en yüksek absorbansı verdiği dalga boyu 400-800 nm aralığında 498 nm (λ_{max}) olarak belirlenmiştir. Absorbans ve konsantrasyon arasındaki ilişki, Kongo Kırmızısı'nın 50 ppm'lik stok çözeltisinden oluşturulan kalibrasyon eğrileri kullanılarak belirlenmiştir. Kalibrasyon grafiği Şekil 6.8'de verilmiştir.

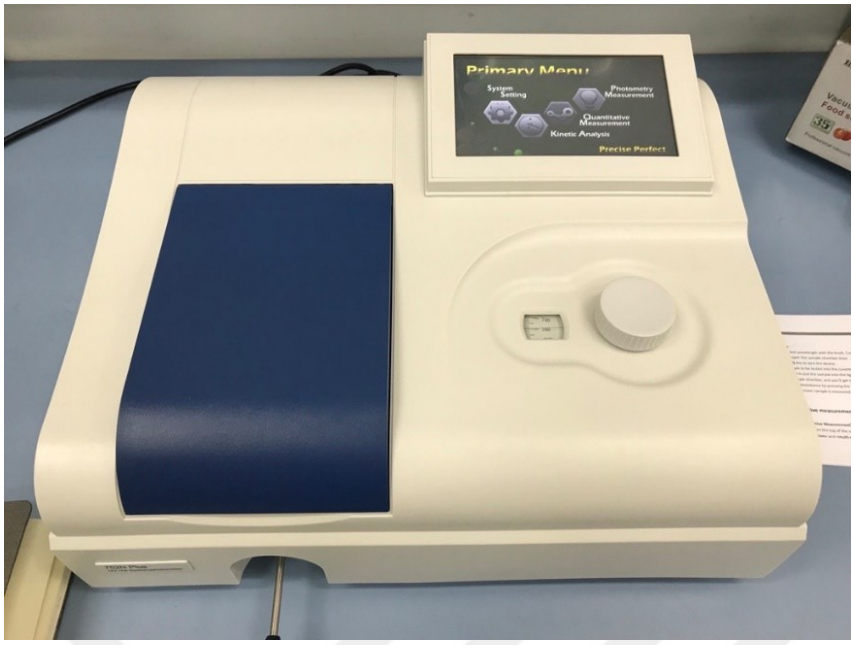
Korelasyon değerlerine karşılık gelen absorbans değerleri koordinat düzlemine yerleştirilerek kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur. Korelasyon değeri (R^2)=0,999, eğim(m)=0,0161 bulunmuştur. Çözünmenin herhangi bir anında ölçülen absorbans değeri ile bileşenin çözünme konsantrasyonu için (6.1) eşitliği kullanılmıştır.

$$y=0,0161x \qquad (6.1)$$



Şekil 6.9 KK boyar maddesine ait kalibrasyon eğrisi

Kullanılan 752N Plus'ın UV-Vis spektroskopisi cihazı Şekil 6.9'de verilmiştir. Numunenin absorbans değerinin doğru ve kesin sonuç vermesi ve çözücüden kaynaklanan absorbsiyon piklerinin önüne geçmek için kör (blank) çözelti kullanılarak zemin değeri (baseline) ölçümü yapılmıştır.



Şekil 6.10 752N Plus UV Vis- Spektrofotometre

Belli bir zamanda adsorban üzerine adsorplanan madde yüzdesini hesaplamak için (6.2) eşitliği kullanılmıştır.

$$\%\text{Giderim} = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0}\right) * 100 \qquad (6.2)$$

C_0: Boya başlangıç konsantrasyonu (mg/L)

C_t: t anındaki boya konsantrasyonu (mg/L)

%Giderim: Adsorplanan boya miktarını

Deneysel tasarım ile oluşturulan deney setlerinin tamamlanmasının ardından elde edilen sonuçlar değerlendirilerek belirlenen optimum koşullarda fotobozunma gerçekleştirilmiştir.

6.3.1 Bilgisayar Destekli Modelleme

- **Design Expert Programı**

Bilimsel araştırmalar, özellikle mühendislik alanında, deneyler aracılığıyla ilerler. Bu deneyler, proseslerin işleyişini anlamak ve optimize etmek, yeni ürünler tasarlamak ve geliştirmek gibi amaçlarla gerçekleştirilir. Uzun ve titiz bir çalışma gerektiren bu deneyler, deneysel tasarım yöntemleri sayesinde daha verimli hale getirilebilir.

Deneysel tasarım yöntemleri; hammadde, işgücü ve zaman gibi kaynakların daha etkin kullanılmasını sağlamaktadır. Deney sayısını azaltarak zamandan tasarruf etmeyi mümkün kılmaktadır. Daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine yardımcı olmaktadır.

Deneysel tasarım yöntemlerini uygulamak için en popüler yazılımlardan biri olan Design Expert, birçok bilimsel çalışmada ve mühendislik uygulamasında tercih edilmektedir.

Kolay kullanımı ve yüksek doğrulukta sonuçlar sunması, bu programı öne çıkaran en önemli özelliklerdir.

Design Expert'in bazı avantajları şunlardır:

- Kullanımı kolay ve anlaşılır bir arayüze sahiptir.
- Farklı deneysel tasarım türlerini destekler.
- Verileri analiz etmek ve sonuçları görselleştirmek için çeşitli araçlar sunar.
- Deneylerin optimize edilmesine yardımcı olur.

Design Expert ile deneysel tasarım, bilimsel araştırmalarda ve mühendislik uygulamalarında daha hızlı, daha verimli ve daha doğru sonuçlar elde etmeyi mümkün kılar.

Son yıllarda, optimizasyon çalışmaları için Design Expert paket programı oldukça popüler hale gelmiştir. Bu programın sunduğu kolay kullanım ve yüksek performans, onu birçok bilim insanı ve mühendisin ilk tercihi haline getirmiştir.

Design Expert'te yer alan cevap yüzey tasarımlarından (RSM) biri olan Box-Behnken tasarım metodu, oldukça basit ve pratik bir yöntemdir. Bu yöntemde, seçilen parametrelerin eş zamanlı etkileşimi incelenerek en uygun sonuçlara ulaşılması amaçlanır.

Box-Behnken tasarım metodunun bazı avantajları şunlardır:

Bu yöntem, diğer yöntemlere kıyasla daha az deney çalışmasıyla daha fazla bilgi elde etmeyi mümkün kılar.

Box-Behnken tasarımı, parametrelerin birbirleriyle nasıl etkileşime girdiğini net bir şekilde ortaya koyar. Deneysel verilerden optimum noktanın bulunmasına yardımcı olur.

- **Anova Analizi**

Deneysel çalışmalar sonucunda sistem üzerinde elde edilen cevaplar doğrultusunda 17 deneyin hangi koşullar altında gerçekleştirilmesi gerektiğini dair istatistik anlam sağlayan analizdir. Doğrulanmış tahmin modellerinden güç alan sayısal optimizasyon aracı, her faktör için en uygun değerleri belirleyerek deneysel çalışmanın başarıya ulaşmasını sağlar. Yazılım, her faktörün ana etkilerini ve faktörler arasındaki etkileşimleri paralel olarak tüm faktörlerin değerlerini değiştirerek belirler. Burada, cevap (R1) kısmına deney tasarımının öngördüğü şartlarda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen deneysel veriler yazılarak tasarım meydana getirilir. Bu aşama sonrası, hesaplamalar için gerekli olan model denklem, Anova analizi ile Design Expert programı vasıtasıyla oluşturularak, gerekli grafiksel incelemelerin yapılmasına olanak sağlar.

6.4 Karakterizasyon

Bu çalışmada magnezyum oksit ve borik asit reaktifleri hammadde olarak kullanılarak magnezyum borat üretimi gerçekleştirilmiştir. Kapayıcı ajan katkılı ve katkısız elde edilen magnezyum boratın endüstriyel boyaların atık sulardan arıtılmasını etkileyen faktörler incelenerek sentezlenen ürünlerin karakterizasyonu amaçlanmıştır.

Karakterizasyon sonuçları için, elde edilen reaksiyon sonrası ürünler kilitli torbalara konarak XRD, SEM ve TEM analizleri için Yıldız Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'na gönderilmiştir.

XRD analizi ile, her bir kristalin kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarını tarayarak karakteristik bir kırınım deseni oluşturur. Bu desen, her kristalin fazı için benzersiz bir parmak izi gibidir ve kristalin tanımlanmasını sağlar. XRD yöntemi, numuneye zarar vermeden çok küçük miktarda maddeyi bile analiz edebilir. Bu sayede kayaçlar, kristaller, ince filmler ve polimerler gibi çeşitli malzemelerin nitel ve nicel olarak incelenmesi mümkündür.

Yıldız Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Malvern PANalytical X'Pert PRO marka XRD cihazı (Şekil 6.10) çok amaçlı üniteleri ile hizmet vermektedir. Elde edilen ürünlerin kristalografik yapısını ve kimyasal bileşimini belirlemek için Malvern PANalytical X'Pert PRO marka XRD cihazında (Şekil 6.10) 45kV ve 40mA parametrelerinde 7 - 90° 2θ aralığında, Cu-Kα tüpünde elde edilen X-ışınlarla kimlik tespitleri yapılmıştır. Kristalit boyutu eşitlik (6.3)' de verilen Scherrer denklemi kullanılarak tahmin edilmiştir.

$$t = \frac{K.\lambda}{\beta \cdot \cos(\theta)} \tag{6.3}$$

Denklemde verilen, t kristalit boyutudur (nm), K boyutsuz şekil faktörüdür, λ X-Işınının dalga boyudur (1,54 nm), β (FWHM) için maksimum yoğunluğun yarısıdır ve θ Bragg açısıdır (°).

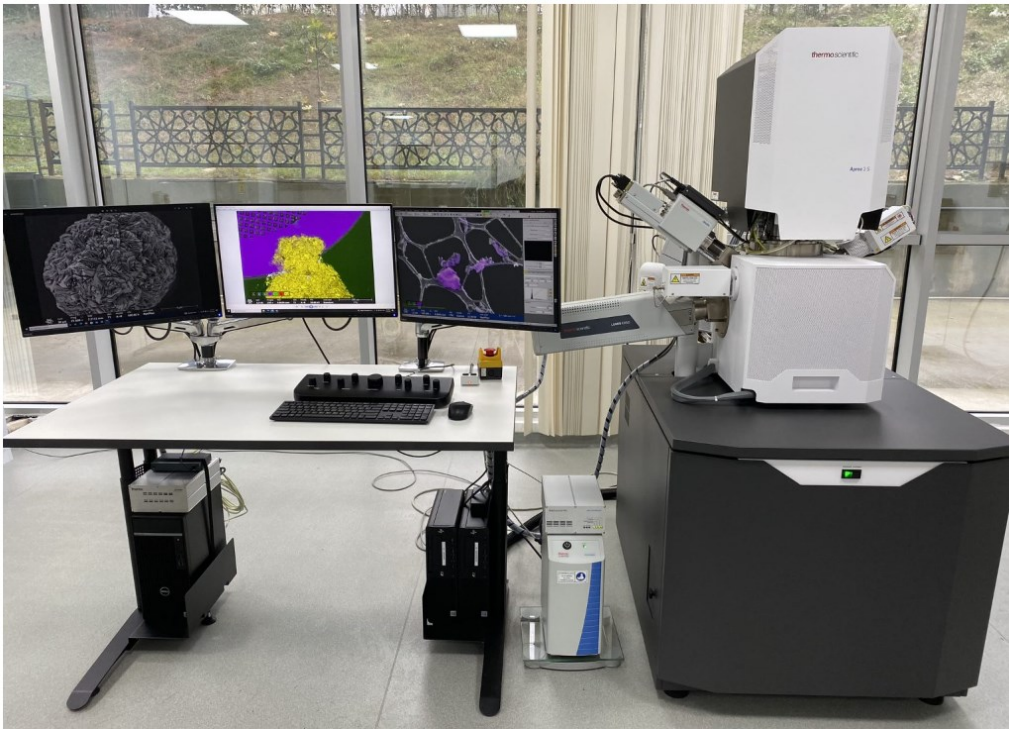


Şekil 6.11 X-Işını kırınım (XRD) cihazı

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), ince bir elektron demetiyle numune yüzeyini tarayarak, yüzeydeki topografik ve kimyasal bilgiler içeren sinyaller üretir. Bu sinyaller, dedektörler tarafından toplanarak bilgisayara aktarılır ve numunenin detaylı görüntüsü elde edilir.

Apreo 2, yüksek çözünürlüğe sahip, düşük enerjili bir elektron mikroskobudur. Bu mikroskop, numunelerin yüzeylerini elektronlar ile tarayarak ve elektronların ve fotonların etkileşiminden oluşan sinyalleri analiz ederek görüntü oluşturur.

Yıldız Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı SEM bölümünde Thermo Scientific Apreo 2 S LoVac marka SEM cihazı bulunmaktadır. Hammaddelerin yüzey morfolojilerini belirlemek için, Yüksek Çözünürlüklü Analitik Elektron Mikroskobu (Şekil 6.11) kullanılmış ve analizler 30 kV'da gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.12 Yüksek çözünürlüklü analitik elektron mikroskobu

Fotobozunma işlemine tabi tutulan numuneler UV-Vis spektroskopi cihazı kullanılarak Kongo Kırmızısı giderimleri incelenmiştir.

UV-Vis spektroskopi cihazının temel prensibi absorbsiyon kanunudur. Beer - Lambert yasası olarak bilinen bu kanun, emici malzemelerin kalınlığı ile numune çözeltisinin konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Soğurulan ışık miktarının soğuran maddenin konsantrasyonu ve soğuran malzemenin kalınlığı ile orantılı olduğunu belirtmektedir [162].

7
DENEYSEL SONUÇLAR

7.1 Karakterizasyon Sonuçları

Hammaddeler ve deneysel çalışmalar sonucu elde edilen ürünler X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Geçirimli (transmisyon) elektron mikroskobu (TEM) teknikleri kullanılarak karakterizasyon işlemi yapılmıştır. Sentezlenen ürünlerin isimlendirilmesi Tablo 7.1'de verilmiştir.

Tablo 7.30. Sentezlenen ürünlerin isimlendirilmesi

NUMUNE ADI	NUMUNE KODU
Katkısız Magnezyum Borat Üretimi	BHT-0
Oleik Asit Katkılı Magnezyum Borat Üretimi	BHT-1
CTAB Katkılı Magnezyum Borat Üretimi	BHT-2
PVP Katkılı Magnezyum Borat Üretimi	BHT-3

7.1.1 XRD Analiz Sonuçları

Hidrotermal manyetik karıştırma yöntemiyle sentezlenen ürünlerin XRD bilgileri Tablo 7.2' de verilmiştir. Sentezlenen ürünler incelendiğinde aynı kafes yapısına sahip iki farklı magnezyum borat minerali ortaya çıkmıştır. Elde edilen ürünler, altı mol kristal su içeren "01-076-0540" referans koduna sahip admontit ve "01-076-0539" referans koduna sahip magnezyum borat hidrat yapısıdır. Yapılan karakterizasyon analizleri sonucunda oluşan nano ürünler yüksek kristal özelliği göstermiş olup saf monoklinik kristal yapısına sahiptir.

Tablo 7.31 Sentezlenen ürünlere ait XRD bilgileri

Mineral İsmi	Admontit	Magnezyum Borat Hidrat
PDF No	01-076-0540	01-076-0539
Kimyasal Formülü	$MgO(B_2O_3)_3(H_2O)_7$	$MgO(B_2O_3)_3(H_2O)_6$
Kristal sistemi	Monoklinik	Monoklinik
Uzay grup	P21/c	P21/c
Uzay grup numarası	14	14
Hesaplanan Yoğunluk (g/cm^3)	1.83	1.86
Ölçülen Yoğunluk (g/cm^3)	1.83	1.87
Hücre hacmi (pm^3)	1363.03 10^6	1273.63 10^6
a(Å)	12.6640	10.8300
b(Å)	10.0910	10.4510
c(Å)	11.3220	11.3110
Alpha(^{0})	90.00	90.00
Beta (^{0})	109.60	95.30
Gamma (^{0})	90.00	90.00

Oluşan ürünlerin birbirinden farklı oluşumlar göstermediği, Magnezyum-bor bağlanmasının değişmediği, yapıya bağlanan kristal su yapısının değiştiği görülmektedir.

01-076-0540 referans kodu ile gösterilen tüm kırınım pikleri, admontit'in saf monoklinik fazı olarak indekslenmiştir.

01-076-0539 referans kodu ile gösterilen tüm kırınım pikleri, magnezyum borat hidratın saf monoklinik fazı olarak indekslenmiştir.

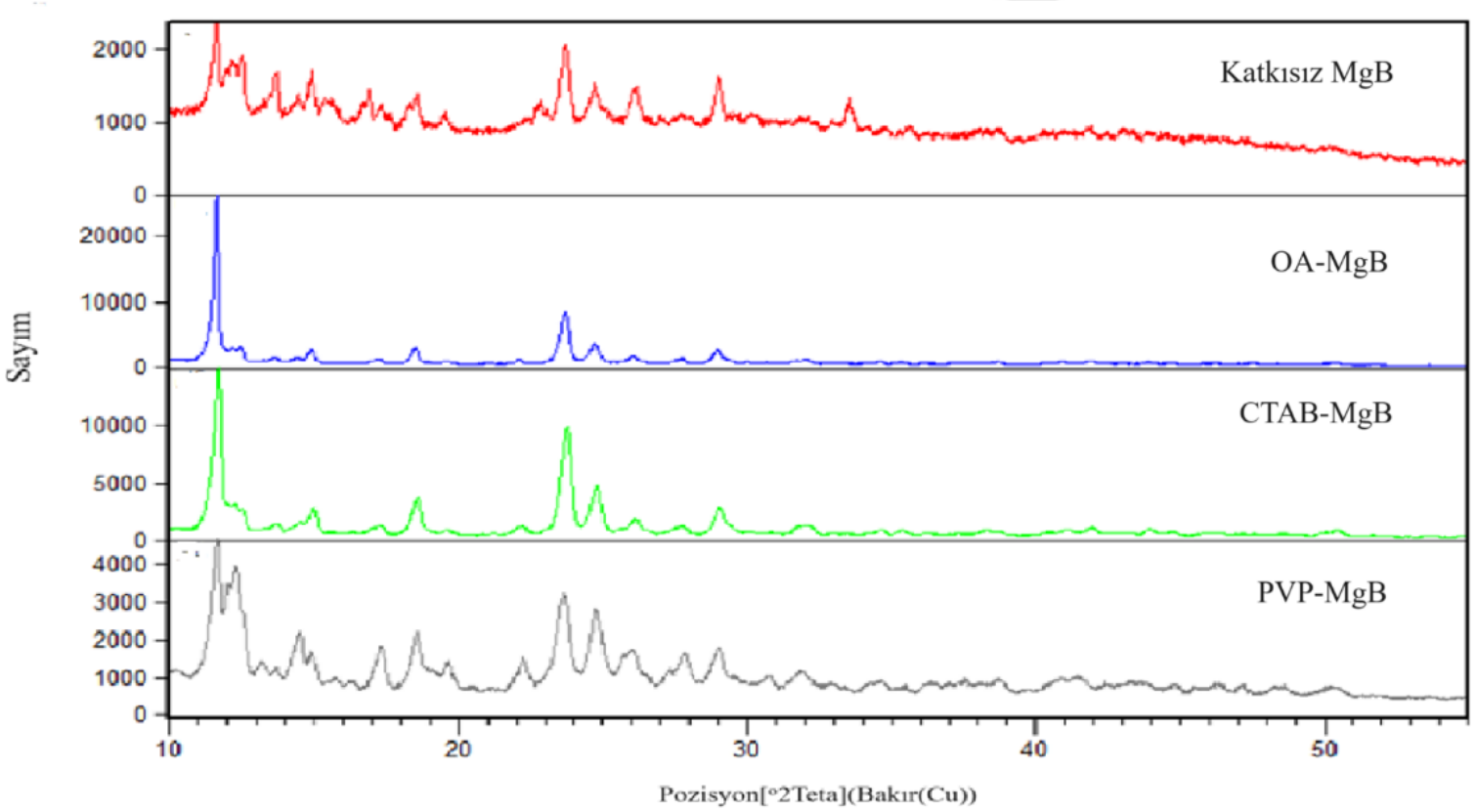
Sentezlenen ürünlere ait XRD kristal skor sonuçları Tablo 7.3' de verilmiştir.

Tablo 7.32 Sentezlenen ürünlere ait XRD skorları

Numuneler	**Referans Numaraları**	
	01-076-0540	**01-076-0539**
BHT-0	21	-
BHT-1	8	19
BHT-2	20	29
BHT-3	8	18

XRD sonuçları incelendiğinde en yüksek skorlar CTAB (BHT-2) kapayıcı ajan katkılı magnezyum borat üretiminden elde edilmiştir.

Hidrotermal metot ile 100°C' de sentezlenen magnezyum borat örneklerinin XRD patterni Şekil 7.1'de verilmiştir

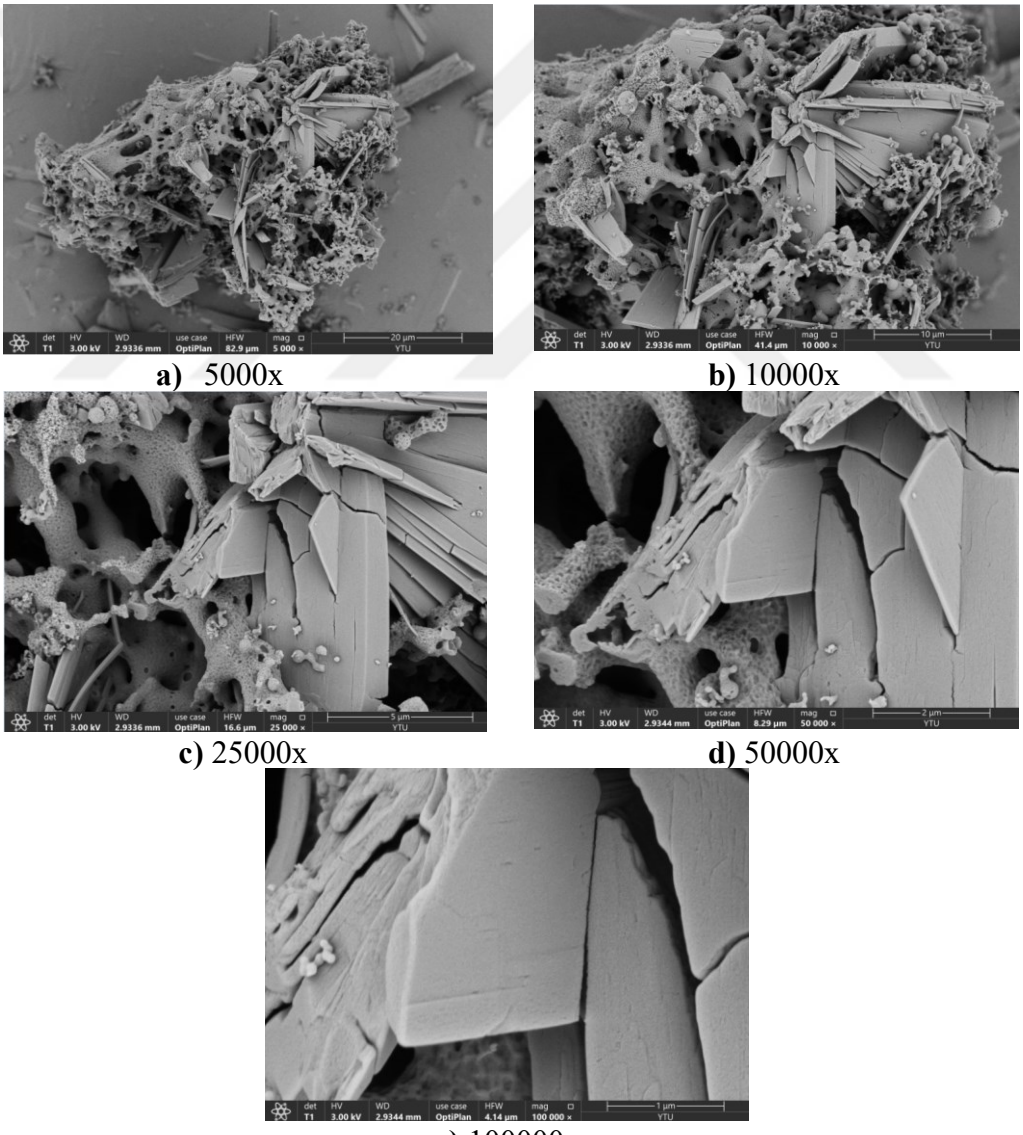


Şekil 7.1 Hidrotermal metot ile 100°C' de sentezlenen ürünlerin XRD desenleri

7.1.2 SEM Analiz Sonuçları

Hidrotermal (sıvı hal), manyetik karıştırma yöntemi ile borik asit ve magnezyum oksit kullanılarak sentezlenen admontit ve magnezyum borat hidrat minerallerinin yüzey morfolojisini belirlemek ve tane boyutu analizini gerçekleştirmek amacıyla SEM analizi yapılmıştır.

Katkısız üretim sonucu elde edilen ürünlerin 10000-25000-50000-100000 büyütme oranları için SEM yüzey görüntüleri Şekil 7.2'de gösterilmektedir. Üretilen katkısız magnezyum boratın yüzey morfolojileri görüntüleri incelendiğinde tanecik boyutlarının 500 nm - 1µm aralığında olduğu belirlenmiştir. Sentezlenen örneğin morfolojisi incelendiğinde tabakalı ve çok köşeli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.



a) 5000x **b)** 10000x

c) 25000x **d)** 50000x

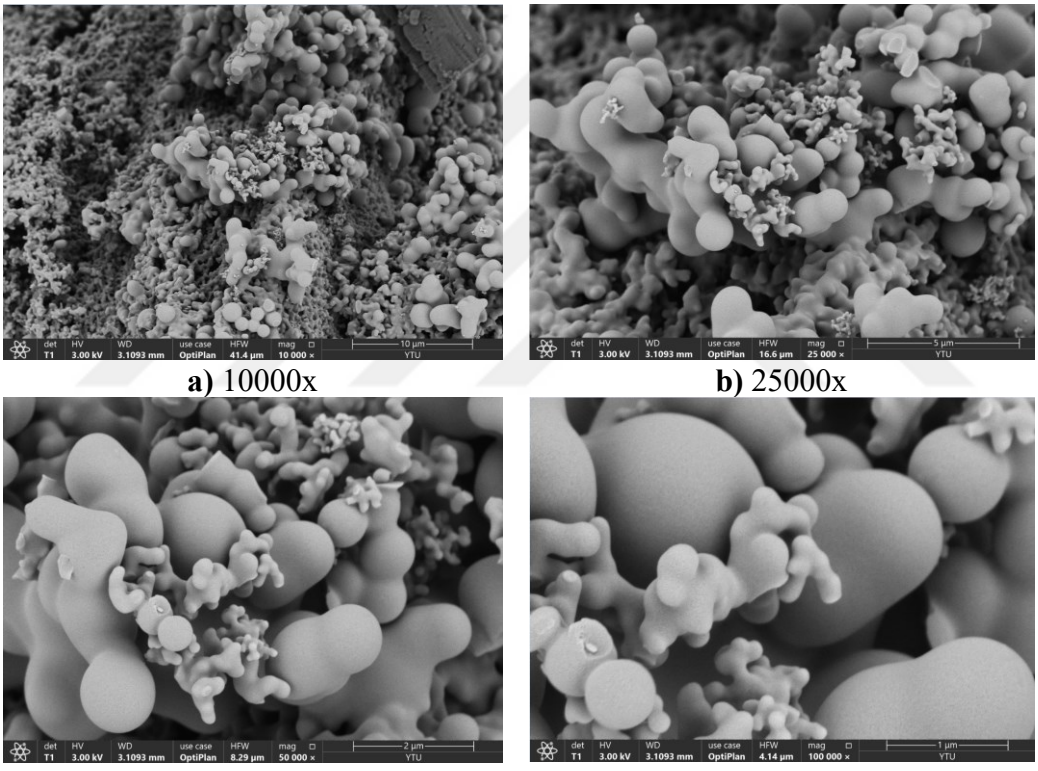
e) 100000x

Şekil 7.2 Üretilen katkısız magnezyum boratın yüzey morfolojileri (BHT-0)

Kapayıcı ajanların elde edilen minerallerin yüzey morfolojisi üzerindeki etkisini incelemek için Oleik asit, CTAB ve PVP malzemeleri üretimde kullanılarak sentezlenmiştir.

Oleik asit kapayıcı ajanı kullanılarak üretilen ürünlerin 5000-10000-25000-50000-100000 büyütme oranları için SEM yüzey görüntüleri Şekil 7.3'te gösterilmektedir.

Üretilen katkısız magnezyum boratın yüzey morfolojileri ile üretilen oleik asit katkılı magnezyum boratın yüzey morfolojileri ile karşılaştırıldığında; oleik asit katkısının partikül morfolojisinin tabakalı ve çok köşeli görüntüden yuvarlak partikül oluşumuna çevirdiği dikkat çekmektedir. BHT-1 örneği için partikül boyutu 200 - 500 nm aralığında belirlenmiştir.

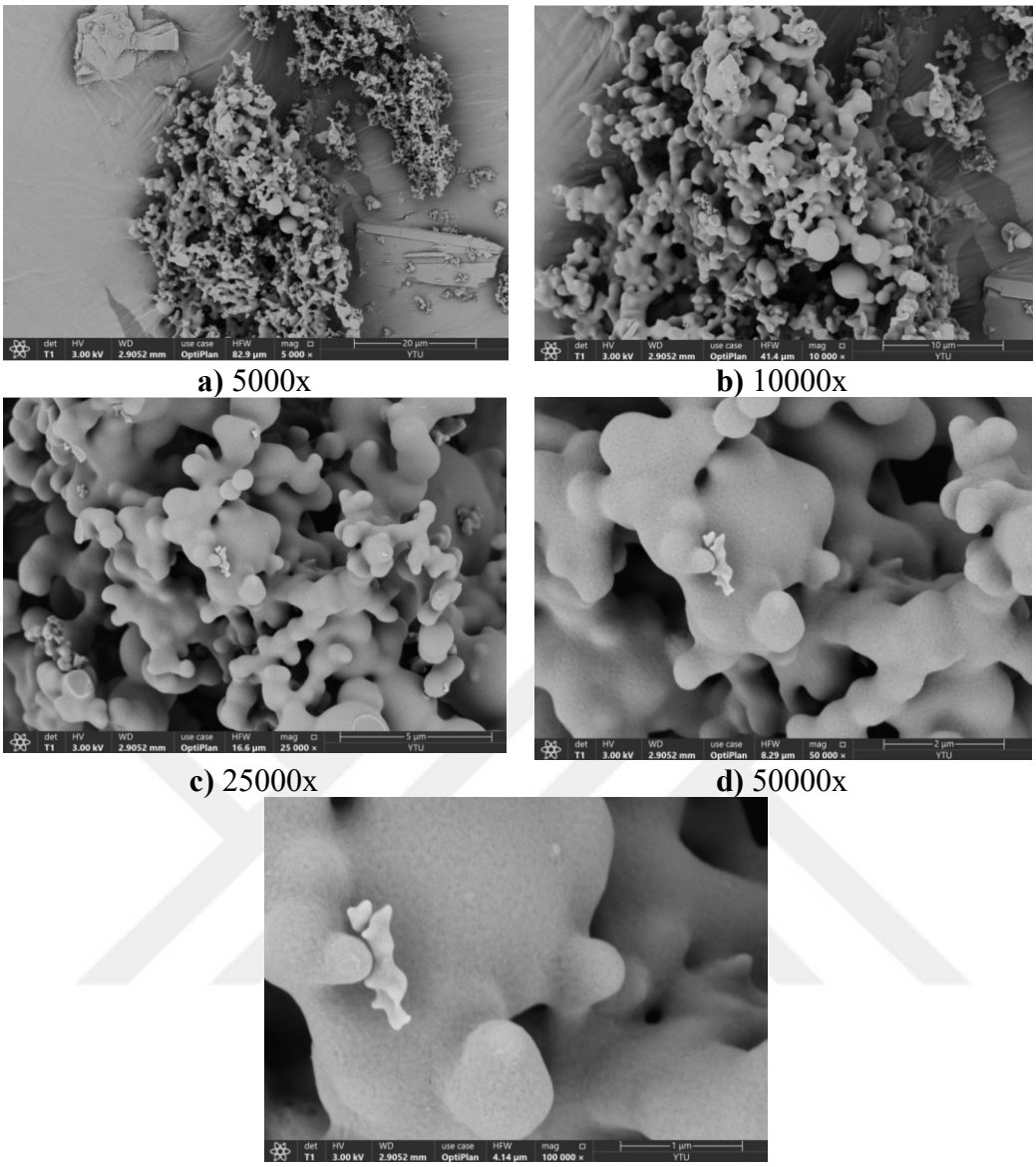


a) 10000x **b)** 25000x

c) 50000x **d)** 100000x

Şekil 7.3 Üretilen Oleik Asit katkılı magnezyum boratın yüzey morfolojileri (BHT-1)

CTAB kapayıcı ajanı kullanılarak üretilen ürünlerin 5000-10000-25000-50000-100000 büyütme oranları için SEM yüzey morfolojileri Şekil 7.4'te gösterilmektedir.



a) 5000x **b)** 10000x

c) 25000x **d)** 50000x

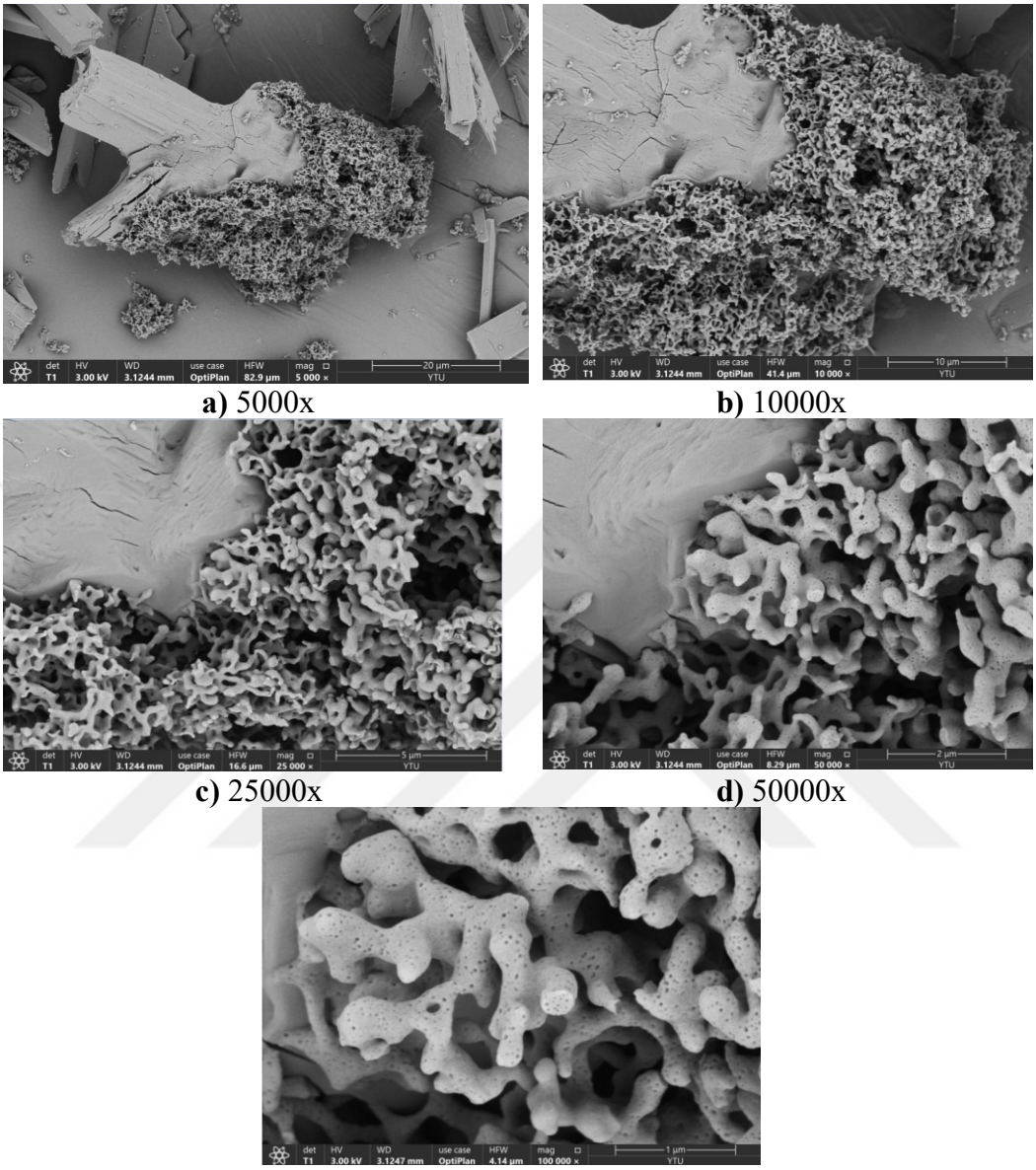
e) 100000x

Şekil 7.4 Üretilen CTAB katkılı magnezyum boratın yüzey morfolojileri (BHT-2)

BHT-2 örneğinin SEM morfolojisi incelendiğinde, CTAB kapayıcı ajanının sentezlenen magnezyum boratın tanecik boyutunu artırdığı ve tanecik şekil yapısında yuvarlak tane oluşumunun yanı sıra taneciklerin aglomere olduğu görülmüştür. BHT-2 örneği için partikül boyutu aralığı 600 nm - 1,5 µm aralığında değişmiştir.

PVP kapayıcı ajanı kullanılarak üretilen ürünlerin 5000-10000-25000-50000-100000 büyütme oranları için SEM yüzey görüntüleri Şekil 7.5' de gösterilmektedir. BHT-3 örneğinin SEM yüzey morfolojisi incelendiğinde, PVP katkısının oluşan magnezyum boratın yüzeyinde gözenekliliği artırdığı dikkat

çekmiştir. Gözenekliliğin olduğu bölgelerde homojen dağılım, dallanmış bir yapı oluşumu görülmüştür.



a) 5000x **b)** 10000x

c) 25000x **d)** 50000x

e) 100000x

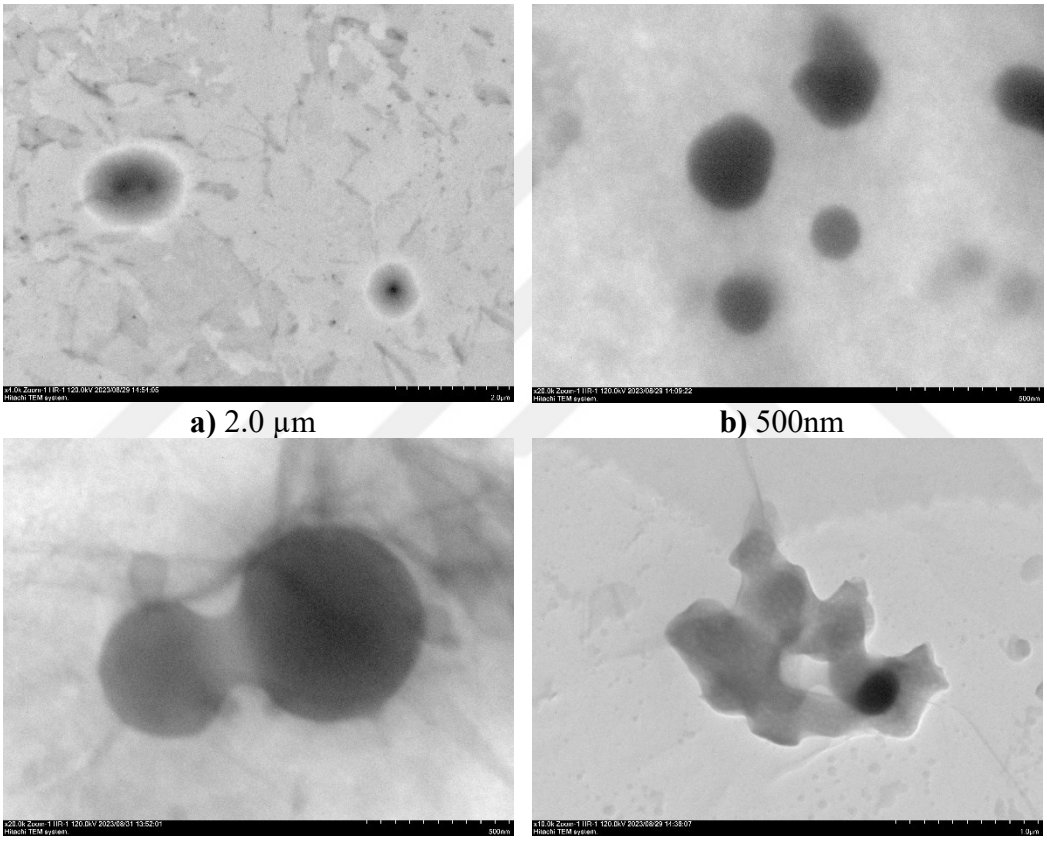
Şekil 7.5 Üretilen PVP katkılı magnezyum boratın yüzey morfolojileri (BHT-3)

Parçacık boyutunun ve şeklinin ayarlanmasını kolaylaştırdığı için tüm denemelerde hidrotermal yöntem tercih edilmiştir. Homojen bir görünüm elde edilerek topaklanmanın önüne geçilmiştir.

Morfolojik analizlerden de anlaşılacağı üzere admontit ve magnezyum borat hidratın çok köşeli parçacık katmanlarından oluştuğu gözlenmiştir.

7.1.3 TEM Analiz Sonuçları

Görüntüleme ve kırınım tekniklerini birlikte kullanarak elde edilen malzemelerin mikro yapısal incelemesini ve kristal yapılarının belirlenmesini sağlayabilmek için TEM analizi yapılmıştır. Nanometre mertebesinde çok küçük ve ince alanlardan milyon katı büyütmelerle görüntüler elde edilmiştir. Elde edilen TEM görüntüleri Şekil 7.6'da verilmiştir. Bu analiz sonucunda, numunelerin bileşimleri ve partiküllerinin iç yapısı ile ilgili bilgi sağlanmıştır. Elektronlar ve toz arasındaki güçlü etkileşmeden dolayı TEM incelemeleri için kalınlık 1.0 µm -500 nm arasında verilmiştir.



a) 2.0 µm **b)** 500nm

c) 500nm **d)** 1.0 µm

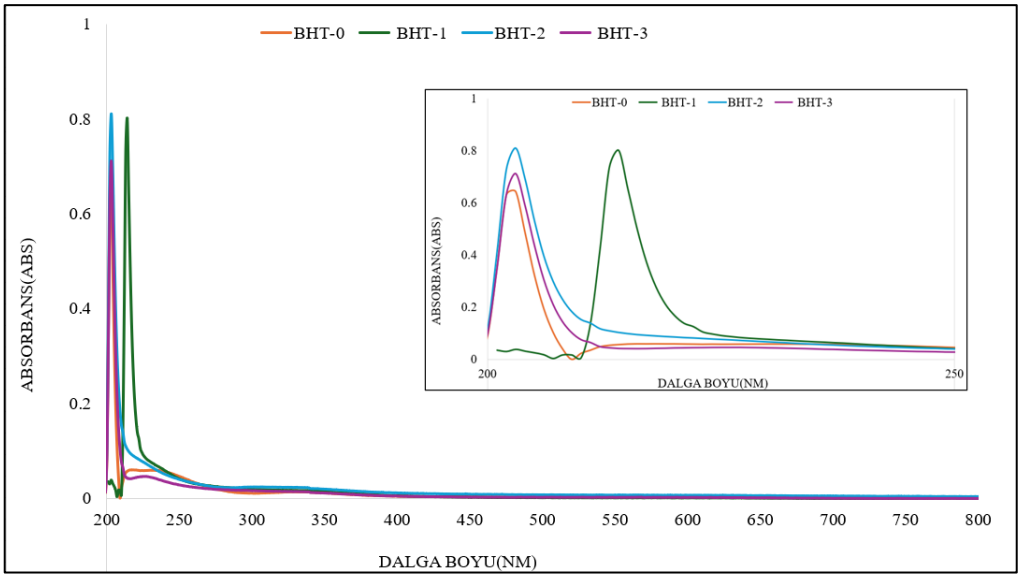
Şekil 7.6 Üretilen magnezyum boratın TEM görüntüsü
a) Katkısız b) OA c) CTAB d) PVP

TEM görüntüleri incelendiğinde, katkısız üretim ile elde edilen yapının farklı boyutlarda ve şekillerde tane büyüklüğüne sahip olduğu görülmektedir. Katkısız (BHT-0), OA (BHT-1) ve CTAB katkılı (BHT-2) örnekler SEM yüzey morfolojileriyle uyumlu olarak küresel tanecik yapısı sergilerken; PVP katkılı (BHT-3) örneği SEM yüzey morfolojisinde de görüldüğü üzere dallanmış yapıya uygun olarak küresel yapıların aglomere olması şeklinde bir TEM görüntüsü

sergilemiştir. OA kapayıcı ajan ilavesi ile elde edilen görüntüde iki farklı tipte yapı görülmektedir. Tanecik şekilleri, yuvarlak veya oval şekilde elde edilmiştir. Yapılar iç içe geçerek, tanecik içleri homojenliğinin azaldığı görülmektedir. CTAB kapayıcı ajan ilavesi ile elde edilen görüntüde tanecik boyutunda büyüme gözlemlenmiştir. Tanecik şekli yuvarlak ve tanecik kenarları nettir. Tanecik yapısında homojen bir görüntü elde edilmiştir. PVP kapayıcı ajan ilavesi ile elde edilen görüntüde tanecik şekli düzensizdir. Tanecik kenarları net olmamakla birlikte, homojen görüntü elde edilememiştir.

7.1.4 UV-Vis Spekstroskopisi Sonuçları

Çözeltilerin UV-Vis spektrofotometre ile absorbans değerleri ölçülerek konsantrasyon analizi yapılmıştır. Belirli stokiyometrik oranlarda bulunan iki veya daha fazla bileşen içeren kristal malzemeler oldukları için UV-vis spektrumunda farklı dalga boyu aralıklarında birden fazla pik oluşmaktadır. Kapayıcı ajan katkılı ve katkısız sentezlenen magnezyum boratın UV-vis absorpsiyon spektrumları, oda sıcaklığında 200-800 nm dalga boyu aralığında kaydedilmiştir. Şekil 7.7, katkısız üretim ve kapayıcı ajan katkılı üretim ile sentezlenen magnezyum borat mineralleri için UV-vis spektrumlarını sunmakta olup, bant aralığı emilimine bağlanabilecek düşük dalga boyu (UV) bölgesinde güçlü emilim göstermektedir. BHT-0, BHT-1, BHT-2 ve BHT-3 200-250 nm dalga boyunda absorplandığı görülmektedir.



Şekil 7.7 Katkılı ve katkısız üretilen magnezyum boratın UV-vis absorpsiyon spektrumları

7.2 Fotobozunma Sonuçları

Fotobozunma çalışmaları Kerman UV 21/13 UV reaktöründe gerçekleştirilmiştir. Kütle, temas süresi ve başlangıç konsantrasyonu gibi reaksiyon parametrelerinin magnezyum borat ile KK boyasının giderimi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Fotobozunma adımı için, belirlenen kütlede fotokatalizör 5 ml 50 ppm Kongo Kırmızısı çözeltisine eklenmiştir. Bu parametrelerin çalışma aralıkları literatür aracılığıyla belirlendikten sonra, bilgisayar destekli deneysel tasarım programı yardımıyla yanıt yüzeyi yöntemi (RSM) kullanılarak deney setleri oluşturulmuştur (Tablo 7.4).

Tablo 7.33 Kongo Kırmızısı fotobozunmasında kullanılan faktörler ve seviyeleri

Faktör	Seviye		
	-1	0	1
A: Kütle (g)	0.01	0.05	0.10
B: Zaman (dk)	5	30	60
C: Başlangıç konsantrasyonu (ppm)	10	30	50

7.2.1 Design Expert Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar

Yanıt yüzeyi tasarımlarından (RSM)-Yanıt Yüzeyi Metodolojisi'nden biri olan Box Behnken tasarım yöntemi seçilmiş ve Varyans Analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Oluşturulan deneysel tasarımda, UV ışınımı altında fotobozunma yoluyla KK giderimi için üç parametre (kütle, temas süresi ve konsantrasyon) eş zamanlı olarak incelenmiştir. Deney setinde yer alan tüm denemeler katkısız magnezyum borat numuneleri kullanılarak yapılmış ve % giderim sonucuna göre optimum kütle, temas süresi ve başlangıç konsantrasyonu belirlenmiştir. Fotobozunma işlemi tüm deney setinde tamamlandıktan sonra, numunelerin sıvı fazı katı partiküllerden ayırmak için çözeltiler 2000 rpm 8 dk santrifüjlenmiştir. Elde edilen sıvı fazların konsantrasyonları 752N Plus cihazının 498 nm dalga boyundaki UV-Vis spektroskopisi kullanılarak belirlenmiştir. Fotobozunma işleminden önceki ve sonraki boya derişimleri arasındaki fark yardımıyla bozunan yani uzaklaştırılan boya miktarları hesaplanmıştır. Yanıt yüzeyi yöntemiyle tasarlanan deneysel verilerin ile KK yüzde giderim sonuçları Tablo 7.5'te verilmiştir.

Tablo 7.34 Yanıt yüzeyi yöntemiyle tasarlanan deneysel verilerin ile KK % giderim sonuçları

Faktör 1 A: Kütle (g)	Faktör 2 B: Zaman (dk)	Faktör 3 C: Başlangıç konsantrasyonu (ppm)	Cevap-1 Son konsantrasyon (ppm)	Fotobozunma (%)
0.06	60.00	10	7.64	23.600
0.1	32.50	10	7.143	28.570
0.06	5.00	10	6.335	36.650
0.01	32.50	10	7.826	21.740
0.06	32.50	30	13.168	56.107
0.01	60.00	30	14.534	51.553
0.1	5.00	30	14.161	52.797
0.01	5.00	30	15.217	49.277
0.1	60.00	30	12.981	56.730
0.1	32.50	50	37.267	25.466
0.06	60.00	50	38.012	23.976
0.01	32.50	50	38.696	22.608
0.06	5.00	50	37.516	24.968

13 deneyin her biri için deney koşulları ayrıntılı bir şekilde incelendikten sonra çalışmalardan elde edilen sonuçlara dayanarak en uygun matematiksel modeli çıkarmak için ANOVA analizi uygulanmıştır. "İndirgenmiş Kuadratik Model" bu bağlamda en uygun model olarak belirlenmiştir. KK giderimi için ANOVA Analizi sonuçları Tablo 7.6'da görülmektedir.

Tablo 7.35 KK giderimi için ANOVA analizi sonuçları

Tepki Yüzeyi Azaltılmış İkinci Dereceden Model için ANOVA Varyans tablosunun analizi [Kısmi kareler toplamı]						
Kaynak	**Kareler Toplamı**	**Serbestlik derecesi**	**Ortalama Kare**	**F Değeri**	**p değeri Olasılık>F**	
Model	2104.53	3	701.51	1937.20	<0,0001	anlamlı
A-Kütle	2.79	1	2.79	7.69	0,0216	
C-İlk Konsantrasyon	1877.22	1	1877.22	5183,90	<0,0001	
C^2	224.52	1	224.52	620,00	<0,0001	
Kalan	3.26	9	0,36			
Genel Toplam	2107,79	12				

Katsayıların anlamlılığının değerlendirilmesinde p değerleri ve F değerleri ele alınmıştır. Özellikle p değerlerinin 0,050'den küçük olması katsayının etkinliği karşıladığını göstermektedir. 1937.20'nin Model F değeri, modelin dikkate değer olduğunu ima etmektedir.

Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir "Model F-Değeri"nin oluşma ihtimali yalnızca %0,01'dir. 0,0500'den küçük "Prob > F" değerleri model terimlerinin önemli olduğuna işaret etmektedir. Bu durumda dikkat çeken model terimleri olarak A, C, C^2 belirlenmiştir. Belirlenen ikinci dereceden model sonuçlarının istatistiksel sonuçları Tablo 7.7' de verilmiştir.

Tablo 7.36 Belirlenen kuadratik model sonuçlarının istatistiksel sonuçları

Standart Sapma	0.60	**R^2**	0,9985
Anlam	19.27	**Düzeltilmiş R^2**	0,9979
% Varyasyon katsayısı (CV)	3.12	**Tahmin edilen R^2**	0,9970
Tahmini Kareler Toplamı	6.34	**Yeterli Kesinlik**	95.3172

0,9979'luk " düzeltilmiş R^2" değeriyle makul bir uyum içerisindedir. Sinyal-gürültü oranını ölçmek için " yeterli kesinlik" kullanılmıştır. 4'ten büyük oranların istenilebilir olduğu varsayılabilir. Deneylerde elde edilen 95.317 oranı yeterli bir sinyale işaret etmektedir. Sonuçlara göre 1937.20 model F değerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu açıklandı. 0,9985'lik düzeltilmiş belirleme katsayısı (R^2) da modelin yeterliliğini doğrulanmıştır.

Regresyon modelinin belirleme katsayısı (R^2) 0,9985'tir. Sonuçlar, modelin ortalamaya göre veri noktalarındaki değişkenliğin %95,317' sini açıkladığını göstermiştir. Ancak R^2 metriği serbestlik derecesi sayısından etkilenmiştir ve bu da düzeltilmiş R^2'yi modellerin değerlendirilmesi için daha güvenilir hale getirmiştir. Bu sonuç özellikle model öğelerinin sayısı arttığında doğrudur çünkü düzeltilmiş R^2, modele önemsiz terimlerin dahil edilmesini azaltmaya yardımcı olmaktadır. Modelin yeterliliği 0,95'in üzerinde bir değerle garanti altına alınmıştır.

Ek olarak, 0,9970'lik beklenen R^2 değeri ile 0,9979'luk düzeltilmiş R^2 değeri arasındaki güçlü uyum, deneysel ve tahmin edilen Kongo Kırmızısı giderimi arasında doğrusal bir korelasyonun varlığı anlamına gelmektedir.

Gerçek faktörleri içeren son formül Eşitlik (7.1)'de verilmiştir.

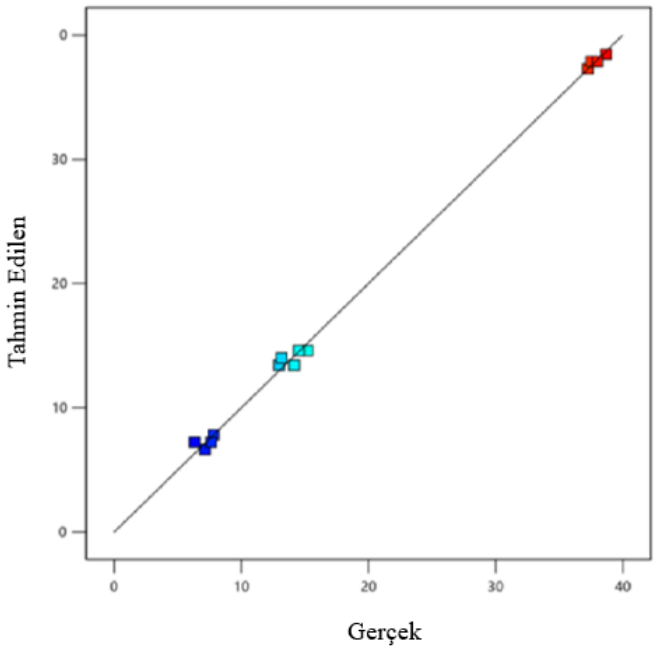
$$C_t = 10{,}97580 - (13{,}11389 \text{ x A}) - (0{,}51541\text{x}C_0) + \left(0{,}021355\text{x}{C_0}^2\right) \qquad (7.1)$$

C_0: İlk konsantrasyon g/mL

C_t: Son konsantrasyon g/mL

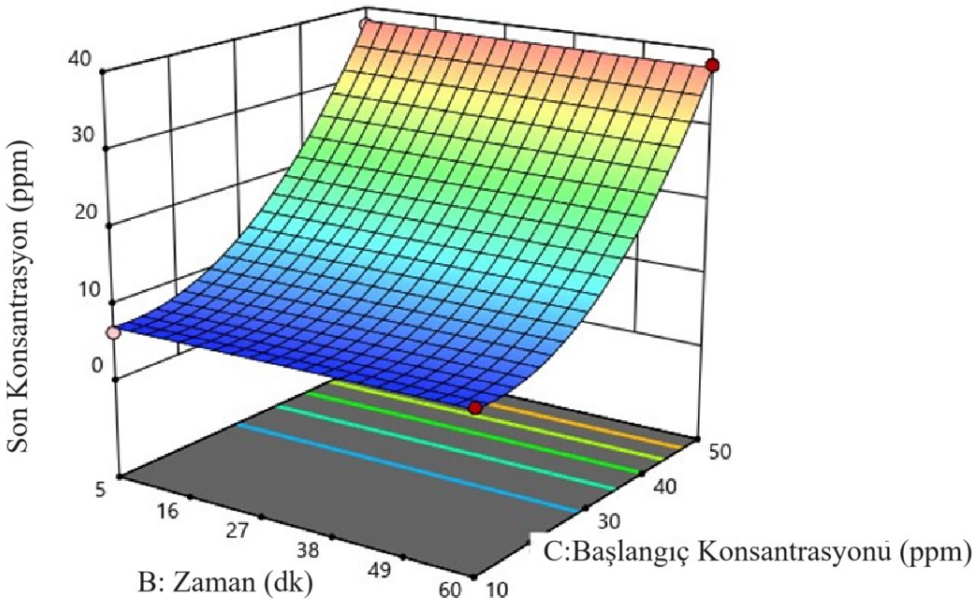
A: Kütle (g)

Modelin tahmin değerlerine karşı ile deneysel çalışma sonucunda elde edilen değerler arasındaki ilişkiyi içeren grafik Şekil 7.8' de sunulmuştur. Şekil 7.9' da yer alan modele ait değer ilişkisi grafiği, önemli miktarda model ve deneysel çıktılar arasındaki örtüşme olduğu görülmektedir. Bu sonuç, ikisi arasında yüksek derecede uyumluluğun göstergesidir ve geliştirilen modelin deneysel çalışma ile uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.8 Modelin tahmin değerlerine karşı gerçek değeri

KK adsorpsiyonunun başlangıç konsantrasyonu ve temas süresi ile değişimini gösteren 3 boyutlu grafik Şekil 7.9'da görülmektedir. Adsorpsiyonun en yoğun olduğu bölgeler kırmızı ile gösterilirken, renk spektrumunda maviye doğru hareket, değerin azaldığını göstermektedir. KK' nın başlangıç konsantrasyonunun arttırılması, fotobozunma işlemi için solvent içindeki moleküller arasında daha iyi etkileşime yol açacaktır.



Şekil 7.9 KK adsorpsiyonunun başlangıç konsantrasyonu ve temas süresi ile değişimini gösteren 3D yüzey

7.2.2 Magnezyum Borat ile Yapılan Çalışmalarda Fotobozunmasına Etki Eden Faktörler

7.2.2.1 Kütlenin Fotobozunma Üzerindeki Etkisi

Magnezyum borat fotokatalisti ile boyarmadde gideriminde fotokatalist miktarı parametresinin etkisi araştırılmıştır. Fotokatalist miktarı, adsorpsiyon kapasitesini doğrudan etkiler. Eğer fotokatalist miktarı yetersizse adsorpsiyon tam olarak gerçekleşmezken, aşırı miktarda kullanılması ise gereksiz maliyete neden olur. Bu nedenle, en uygun adsorpsiyon performansını elde etmek için fotokatalist miktarının dikkatlice optimize edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle magnezyum borat üzerinde KK boyar maddesinin bozunma işleminde en uygun fotokatalist miktarı belirlenmiştir. Bu amaçla KK boyası için 0,01 g, 0,06 g ve 0,10 g miktarlarında magnezyum borat kullanılmıştır. Boya ile yapılan fotobozunma çalışmasında fotokatalist miktarının artmasıyla adsorpsiyon yüzdesinin arttığı görülmüştür. Fakat aşırı fotokatalist kullanımından kaçınmak için 0,06 g fotokatalist miktarları optimum koşul olarak seçilmiştir. Fotooksidasyon reaksiyonu sonucunda optimum belirlenen kütle ile elde edilen sonuçlar, UV radyasyon yoğunluğunun atıksudan renk gideriminde etkili olduğunu göstermiştir.

7.2.2.2 Temas Süresinin Fotobozunma Üzerindeki Etkisi

Yapılan çalışmada, farklı sürelerde numune örnekleri alınmıştır. Boya ve fotokatalist arasındaki etkileşim süresi, adsorpsiyon verimliliği üzerinde doğrudan etkilidir. Eğer etkileşim süresi yetersiz kalırsa, adsorpsiyon işlemi tam olarak gerçekleşmez ve istenen verim elde edilemez. Öte yandan, etkileşim süresinin gereğinden fazla uzatılması, boyanın bozunmasına ve sistem verimliliğinin düşmesine neden olabilir. Yapılan çalışmalarda, 25 dakikalık bir etkileşim süresinin, hem adsorpsiyon verimliliği hem de bozunma oranı açısından en uygun sonuçları verdiği belirlenmiştir.

7.2.2.3 Başlangıç Konsantrasyonunun Fotobozunma Üzerindeki Etkisi

Magnezyum borat üzerine yapılan çalışmada 10 ile 50 mg/L arasında KK boyar maddesi içeren farklı çözeltiler hazırlanmıştır. Bu değişik başlangıç konsantrasyonlarıyla belirli bir miktar magnezyum borat kullanılarak adsorplanan boyaların miktarındaki değişim incelenmiştir. Sonuç olarak her bir boyar madde konsantrasyonu arttığında adsorpsiyonun arttığı gözlemlenmiştir. Giderim yüzdesi verileri incelendiğinde en yüksek giderimin 30 ppm'de olduğu tespit edilmiştir. Optimum koşul olarak 30 ppm belirlenmiştir.

7.2.3 Optimum Koşullar İçin Katkısız ve Kapayıcı Ajan Katkılı Magnezyum Borat Sonuçları

Fotobozunma etki eden kütle, temas süresi ve başlangıç konsantrasyon parametreleri incelenmiştir. Belirlenen optimum koşullar Tablo 7.8'de verilmiştir.

Tablo 7.37 Katkısız ve kapayıcı ajan katkılı optimum deney set parametreleri

Kütle (g)	Temas süresi(dk)	Başlangıç konsantrasyon (g/mL)
0.06	25	30

Kapayıcı ajan katkılı magnezyum borat ve katkısız üretilen magnezyum borat belirlenen optimum sürede Kerman UV 21/13 UV reaktöründe bekletilmiştir. Numune tüpü içerisindeki sıvı fazı katı partiküllerden ayırmak için çözeltiler 2000 rpm 8 dk santrifüjlenmiştir. Elde edilen sıvı fazların konsantrasyonları 498 nm dalga boyundaki UV-Vis spektroskopisi kullanılarak belirlenmiştir. Fotobozunma işleminden önceki ve sonraki boya derişimleri arasındaki fark yardımıyla bozunan yani uzaklaştırılan boya miktarları hesaplanmıştır.

Elde edilen deney sonuçları Tablo 7.9'da verilmiştir.

Tablo 7.38 Yanıt yüzeyi yöntemiyle tasarlanan deneysel verilerin ile KK % giderim sonuçları

Numune	C: Başlangıç konsantrasyonu (ppm)	Son konsantrasyon (ppm)	Adsorpsiyon (%)
BHT-0 (Katkısız-MgB)	30	15.093	49.689
BHT-1 (OA Katkılı-MgB)	30	15.590	48.033
BHT-2 (CTAB Katkılı-MgB)	30	11.988	60.041
BHT-3 (PVP Katkılı-MgB)	30	14.596	51.346

Sonuçlar incelendiğinde katkısız magnezyum borat ile kapayıcı ajan katkılı magnezyum borat fotobozunma çalışmalarında en yüksek giderim oranı CTAB kapayıcı ajan katkılı magnezyum boratta gözlemlenmiştir.

8
SONUÇ

8.1 Sonuçlar

Boyarmadde içeren atıksulara uygulanan mevcut renk giderme yöntemleri, fiziksel veya kimyasal arıtmalar, atıksu hacminin küçük olduğu durumlarda etkilidir. Yüksek hacimdeki suyun arıtılmasında geleneksel arıtma yöntemleri yeterli olmamaktadır. Bu çalışmada endüstriyel atıksuların arıtımında fotobozunma yönteminin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar incelenerek, elde edilen sonuçlar ile karşılaştırma Tablo 8.1'de verilmiştir. Kongo kırmızısı çözeltilerinin renk giderme işleminde fotokimyasal proseslerin kullanımının işlevselliği ve endüstriyel açıdan önemli magnezyum boratların etkinliği Box-Behnken tasarımı ile incelenmiştir. Yapay hidrotermal sentez yöntemiyle üretilmiş olup KK fotobozunmaya katkısı araştırılmıştır.

Hidrotermal yöntemle sentezlenen magnezyum borat örnekleri üretiminde katkısız ve kapayıcı ajan katkılı (Oleik asit, CTAB ve PVP) kullanılarak üretimler gerçekleştirilerek magnezyum boratlar elde edilmiştir. Elde edilen örnekler kullanılarak sulu çözeltilerden Kongo Kırmızısı fotobozunması araştırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hazırlanan magnezyum borat örnekleri XRD, SEM ve TEM gibi yöntemlerle karakterize edilmiştir. Sentezlenen katkısız Magnezyum borat örneklerinin XRD sonucunda Admontite "01-076-0540, $MgO(B_2O_3)_3(H_2O)_7$" elde edilmiş olup, kapayıcı ajan katkılı üretimlerde ise hem Admontit hem de Magnezyum borat hidrat yapısına sahip "01-076-0539, $MgO(B_2O_3)_3(H_2O)_6$" üretilmiştir. Ortaya çıkan Admontit, ve magnezyum borat hidrat monoklinik bir kafes yapısına ve yüksek bir XRD puanına sahiptir. Elde edilen numunelerin SEM ve TEM spektrumları karşılaştırılmıştır. SEM ve TEM görüntüleri incelendiğinde morfolojik yapısı ve tanecik büyüklüğü olarak en uygun CTAB kapayıcı ajan

kullanımında gözlemlenmiştir. Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan boya çözeltilerine farklı kütlelerde magnezyum borat ilave edilerek UV reaktöründe fotobozunma yöntemiyle renk giderimi araştırılmıştır. Kütle (0.01, 0.06 ve 0.10 gram), temas süresi (5, 30 ve 60 dk) ve başlangıç konsantrasyonu (10, 30 ve 50 ppm) parametreleri arasındaki ilişki, yanıt yüzeylerinden biri olarak Box-Behnken tasarımı kullanılarak analiz edilmiştir.

Tablo 8.39. Literatürde yapılan çalışmalar ve % fotobozunma verileri

Referans	Kullanılan Fotokatalist	Kullanılan boyar madde	%Fotobozunma	Optimum Kütle (g)	Optimum Temas süresi (dk)	Optimum Konsantrasyon (mg/L)
[163]	SnO_2–Fe_3O_4	Kongo Kırmızısı	50.76	0.03	90	18
[164]	CS/n-CdS	Kongo Kırmızısı	85.9	1.000	180	20
[165]	GO(10)/ZIF-8/HKUST-1	Kongo Kırmızısı	91.81	1.5	60	50
[166]	TiO_2 katkılı rGO	Kongo Kırmızısı	45.00	0.001	100	50
[167]	ZnO NP	Kongo Kırmızısı	57.6	0.002	100	10
[168]	fs-$CoFe_2O_4$	Kongo Kırmızısı	91	0.035	30	5
[169]	TiO_2 katkılı HAp	Kongo Kırmızısı	90.00	0.01	90	40
Bu çalışma	(Katkısız-MgB)	Kongo Kırmızısı	49.69	0.06	25	30
Bu çalışma	(OA Katkılı-MgB)	Kongo Kırmızısı	48.03	0.06	25	30
Bu çalışma	CTAB Katkılı-MgB	Kongo Kırmızısı	60.04	0.06	25	30
Bu çalışma	PVP Katkılı-MgB	Kongo Kırmızısı	51.35	0.06	25	30

Araştırma sonucunda farklı kütlelerdeki magnezyum boratın atıksulardan etkin renk giderimi sağladığı görülmüştür. Fotokatalist başlangıç boya konsantrasyonu, fotokatalist miktarının ve dokusal yapısının fotobozunma kapasitesinde önemli rol oynadığı tespit edilmiştir. Kongo Kırmızısı boyarmadde atıksu arıtımında optimum ekstraksiyon koşulları başlangıç konsantrasyonu 30 ppm, fotokatalist miktarı 0,06 gram ve temas süresi 25 dakika olarak belirlenmiştir. 13 deneyin her birinin hangi koşullar altında yapılması gerektiği üzerinde yapılan Varyans (ANOVA) analizi sonucunda, deneysel çalışmalar sonucunda sistem üzerinde alınan cevaplar doğrultusunda uygun modelin belirlendiği belirlenmiştir. Matematiksel olarak İndirgenmiş Kuadratik Modele uymaktadır.

Elde edilen toplu tarama sonuçları incelenmiştir.

1. Araştırma sonucunda farklı kütlelerdeki magnezyum boratın atıksulardan etkin renk giderimi sağladığı Design-Expert yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. UV Reaktörü ortamı üzerindeki etki, KK boya maddesinin bozulmasına izin vermiştir. Optimum ağırlıkta Kongo Kırmızısı boyasının maksimum uzaklaştırılması sağlanmıştır.

2. Magnezyum borat katkısız ve kapayıcı ajan katkılı (Oleik asit, CTAB ve PVP) hidrotermal yöntemle başarıyla sentezlenmiştir. Admontit ve magnezyum borat hidrat formunda monoklinik kafes yapısına sahip numuneler elde edilmiştir. XRD, SEM ve TEM analizleri kullanılarak yapılan karakterizasyon sonuçlarının literatür ile uyumlu olduğu gösterilmiştir.

3. Fotokatalist başlangıç boya konsantrasyonunun, fotokatalist miktarının ve dokusal yapısının fotobozunma kapasitesinde önemli bir rol oynadığı bulunmuştur.

Bu çalışma, potansiyel bir fotokatalist olabileceği düşünülen magnezyum boratın, Kongo Kırmızısı boyarmaddesinin fotokatalitik bozunmasını etkileyerek atıksu arıtımı açısından umut verici ve yenilikçi bir bakış açısı sağlayacağını göstermektedir.

KAYNAKÇA

[1]“ETİ MADEN - Kullanım Alanları - Tarım,” Etimaden. Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: http://www.etimaden.gov.tr

[2] N. Ediz ve H. Özdağ, "Bor Mineralleri ve Ekonomisi," *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Sayı 2, Kütahya, Türkiye, 2001.

[3] M. B. Başkan ve N. Atalay, "Boron contamination in drinking-irrigation water and boron removal methods," *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, vol. 20, no. 3, pp. 78-84, 2014. doi: 10.5505/pajes.2014.47955.

[4] N. Yenmez, "Stratejik Bir Maden Olarak Bor Minerallerinin Türkiye İçin Önemi," *Coğrafya Dergisi*, vol. 19, no. 19, 2011.

[5] C. Gay, E. Chemist ve H. Davey, "Boron mining and processing in Turkey," *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management*, vol. 24, no. 4, 2008.

[6] C. Helvaci, "Borates," in *Encyclopedia of Geology: Volume 1-6, Second Edition*, vol. 1, 2020. doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.12049-4.

[7] N. Pandey, I. Chakrabarty, K. Barkane, N. S. Mehta ve M. R. Majhi, "Microstructure, mechanical and wear properties of aluminum borate whisker reinforced aluminum matrix composites," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 30, no. 7, 2020. doi: 10.1016/S1003-6326(20)65334-1.

[8] J. An ve X. Xue, "Life cycle environmental impact assessment of borax and boric acid production in China," *Journal of Cleaner Production*, vol. 66, 2014. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.10.020.

[9] W. Zhang, T. Liu ve J. Xu, "Preparation and characterization of 10B boric acid with high purity for nuclear industry," *SpringerPlus*, vol. 5, no. 1, 2016. doi: 10.1186/s40064-016-2310-6.

[10] S. Ullah, A. S. Khan, A. U. Malik, I. Afzal, M. Shahid ve K. Razzaq, "Foliar application of boron influences the leaf mineral status, vegetative and reproductive growth, yield and fruit quality of “Kinnow” mandarin (Citrus reticulata Blanco.)," *Journal of Plant Nutrition*, vol. 35, no. 13, 2012. doi: 10.1080/01904167.2012.717661.

[11] C. Helvaci, "Borate deposits: An overview and future forecast with regard to mineral deposits," *Journal of Boron*, vol. 2, no. 2, 2017.

[12] G. Wang, Q. Xue ve J. Wang, "Volume shrinkage of ludwigite/coal composite pellet during isothermal and non-isothermal reduction," *Thermochimica Acta*, vol. 621, 2015. doi: 10.1016/j.tca.2015.10.013.

[13] A. S. Kipcak, F. T. Senberber, E. M. Derun ve S. Piskin, "Reuse of magnesium wastes in hydrothermal synthesis of a magnesium borate mineral: Admontite," *Environmental Engineering and Management Journal*, vol. 17, no. 3, 2018. doi: 10.30638/eemj.2018.054.

[14] A. S. Kipcak, M. Yildirim, S. A. Yuksel, E. M. Derun ve S. Piskin, "The synthesis and physical properties of magnesium borate mineral of admontite synthesized from sodium borates," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2014, 2014. doi: 10.1155/2014/819745.

[15] F. Tugce Senberber Dumanli, "Magnesium Borates: The Relationship between the Characteristics, Properties, and Novel Technologies," in *Current Trends in Magnesium (Mg) Research*, 2022. doi: 10.5772/intechopen.104487.

[16] E. R. Jones, M. T. H. van Vliet, M. Qadir ve M. F. P. Bierkens, "Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse," *Earth System Science Data*, vol. 13, no. 2, 2021. doi: 10.5194/essd-13-237-2021.

[17] M. P. Shah, A. Sarkar ve S. Mandal, "Wastewater Treatment: Cutting-Edge Molecular Tools, Techniques and Applied Aspects," in *Wastewater Treatment: Cutting-Edge Molecular Tools, Techniques and Applied Aspects*, 2021. doi: 10.1016/B978-0-12-821881-5.00028-3.

[18] U. Nations, *UN World Water Development Report 2021: Valuing Water*, 2021.

[19] Y. S. Kukul, A. D. Ünal Çalişkan ve S. Anaç, "Arıtılmış Atık Suların Tarımda Kullanılması ve İnsan Sağlığı Yönünden Riskler," *Ege Üniv. Ziraat Fak. Derg*, vol. 44, no. 3, 2007.

[20] M. Y. Nassar, A. S. Amin, I. S. Ahmed ve S. Abdallah, "Küre benzeri Mn2O3 nanoparçacıkları: kolay hidrotermal sentez ve adsorpsiyon özellikleri," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 2016.

[21] J. Van Hulse, T. M. Khoshgoftaar ve A. Napolitano, "Experimental perspectives on learning from imbalanced data," in *Proceedings of the 24th international conference on Machine learning*, ACM, 2007, pp. 935–942.

[22] R. F. Guo, Y. Q. Ma ve Z. H. Liu, "Three hierarchical porous magnesium borate microspheres: A serial preparation strategy, growth mechanism and excellent adsorption behavior for Congo red," *RSC Advances*, vol. 9, pp. 20009-20018, 2019.

[23] R. Rajesh, S. S. Kumar ve R. Venkatesan, "Efficient degradation of azo dyes using Ag and Au nanoparticles stabilized on graphene oxide functionalized with PAMAM dendrimers," *New Journal of Chemistry*, vol. 4, pp. 1551-1558, 2014.

[24] Y. Wang, Y. Gong, N. Lin, L. Yu, B. Du ve X. Zhang, "Enhanced removal of Cr(VI) from aqueous solution by stabilized nanoscale zero valent iron and copper bimetal intercalated montmorillonite," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 606, pp. 941-952, 2022.

[25] K. Liu, Y. Yang, F. Sun, Y. Liu, M. Tang ve J. Chen, "Rapid degradation of Congo red wastewater by Rhodopseudomonas palustris intimately coupled carbon nanotube - Silver modified titanium dioxide photocatalytic composite with sodium alginate," *Chemosphere*, vol. 299, pp. 1-10, 2022.

[26] J. Di, M. Zhu, R. Jamakanga, X. Gai, Y. Li, ve R. Yang, "Electrochemical activation combined with advanced oxidation on NiCo2O4 nanoarray electrode for decomposition of Rhodamine B," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 37, pp. 1-9, 2020.

[27] H. D. Rizqi ve A. S. Purnomo, "The ability of brown-rot fungus Daedalea dickinsii to decolorize and transform methylene blue dye," *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 33, pp. 1-9, 2017.

[28] İ. K. Kapdan ve F. Kargi, "Atiksulardan tekstil boyar maddelerinin adsorpsiyonlu biyolojik aritim ile giderimi," *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2000.

[29] Ş. G. Özkan, T. D. Tombal, İ. Ünver, ve A. E. Osmanlıoğlu, "Bor bileşiklerinin özellikleri, üretimi, kullanımı ve nükleer reaktör teknolojisinde önemi," *Bor Dergisi*, vol. 1, no. 2, 2016.

[30] M. Korkmaz, C. Özmetin, A. Cırtlık, ve Ş. İ. Sığırcı, "Full factorial design of experiments for boron removal from solutions by Purolite S 108 resin converted to hydroxyl form," *Particulate Science and Technology*, vol. 35, pp. 742-748, 2017.

[31] Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, *Bor Sektör Raporu*, 2023.

[32] Y. Zhu, Y. Zhang, J. Cai, ve N. S. Hosmane, "Introduction: basic concept of boron and its physical and chemical properties," in *Fundamentals and Applications of Boron Chemistry*, 2022. doi: 10.1016/B978-0-12-822127-3.00003-X

[33] H. Elçiçek, "Sulu ortamda karbondioksit basıncı altında üleksit cevherinin çözünme kinetiği ve optimizasyonu," Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2012.

[34] H. S. Demirel, T. E. İnce, D. Uysal, ve B. Z. Uysal, "Boric Acid Production From Sodium Metaborate With Sulfuric Acid," *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 11, no. 3, 2015. doi: 10.18466/cbujos.22763

[35] TENMAK, "Bor Tarihçesi," [Çevrimiçi]. Erişim: 18 Kasım 2024. [Online]. Available: https://boren.tenmak.gov.tr/tr/tarihce.html

[36] Anadolu Üniversitesi, "Osmanlı İktisat Tarihi," [Çevrimiçi]. Erişim: 18 Kasım 2024. [Online]. Available: https://ets.anadolu.edu.tr/storage

[37] Mindat.org, "Mineral Database," [Çevrimiçi]. Erişim: 18 Kasım 2024. [Online]. Available: http://www.mindat.org

[38] M. J. O'Neil, P. E. Heckelman, P. H. Dobbelaar, ve K. J. Roman (Eds.), *Merck Index, An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals*, 15. Baskı. Cambridge, Birleşik Krallık: Royal Society of Chemistry, 2013.

[39] R. J. Lewis, *Hawley's Condensed Chemical Dictionary*, 15. Baskı. New York: John Wiley & Sons, 2007.

[40] H. Yiğitbaşioğlu, "Türkiye İçin Önemli Bir Maden Bor An Important Ore for Turkey Boron," *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 2004. doi: 10.1501/cogbil_0000000046

[41] H. Menzel ve H. Schulz, "Zur Kenntnis der Borsäuren und borsauren Alkalisalze. X. Der Kernit (Rasorit) Na2B4O7 4H2O," *Zeitschrift Für*

Anorganische Und Allgemeine Chemie, vol. 245, no. 2, 1940. doi: 10.1002/zaac.19402450204.

[42] Mineral Database, "Mineral Bilgileri ve Resimleri 722," [Çevrimiçi]. Erişim: http://www.mindat.org.

[43] "Tincalconite," Wikipedia, [Çevrimiçi]. Erişim: https://en.wikipedia.org/wiki/Tincalconite. [Erişim tarihi: 18.11.2024].

[44] "Kernite," Geology Page, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.geologypage.com/2014/05/kernite. [Erişim tarihi: 18.11.2024].

[45] Ş. G. Özkan, H. Çebi ve M. D. Delice, "Bor minerallerinin özellikleri ve madenciliği," *2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, ss. 224-228, 1997.

[46] I. Sugozu, I. Mutlu ve K. B. Sugozu, "The effect of ulexite to the tribological properties of brake lining materials," *Polymer Composites*, cilt 39, sayı 1, 2018.

[47] "Mineraller," YBM, [Çevrimiçi]. Erişim: https://ybm.org.tr/product-category/mineraller. [Erişim tarihi: 18.11.2024].

[48] D. Gatta, E. Cannaò, V. Gagliardi ve O. Fabelo, "Crystal-chemical reinvestigation of probertite, CaNa[B5O7(OH)4]·3H2O, a mineral commodity of boron," *American Mineralogist*, cilt 107, sayı 7, 2022. doi: 10.2138/am-2022-8086.

[49] R. C. Erd, J. F. Mc Allister ve A. C. Vlisidis, "Nobleite, Another New Hydrous Calcium Borate from The Death Valley Region," *American Mineralogist*, cilt 46, ss. 560-571, 1961.

[50] G. Gündoğmaz, "Bazı Bor İçeren Apatit Malzemelerin Sentezi ve Karakterizasyonu," Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 2007.

[51] "Colemanite," USGS, [Çevrimiçi]. Erişim: http://libraryphoto.cr.usgs.gov/cgibin/show_picture.cgi?ID=ID%2020%20BOM%20Mineral%20Specimens%20096.

[52] H. Yiğitbaşıoğlu, "Türkiye için Önemli Bir Maden: Bor," *Coğrafi Bilimler Dergisi*, cilt 2, ss. 13-25, 2004.

[53] "Pandermit," MTA, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/pandermit. [Erişim tarihi: 12.10.2024].

[54] "Ulexite," Mindat.org, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mindat.org/min-4085.html. [Erişim tarihi: 10.07.2024].

[55] B. Uz, *Mineraller Kristallografi, Mineroloji*, İ.T.Ü. Maden Fakültesi, İstanbul, Türkiye, 1994.

[56] "Probertita," Mineralienatlas, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/MineralData?lang=en&mineral=Probertita. [Erişim tarihi: 15.06.2024].

[57] "Probertite," Webmineral, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.webmineral.com/data/Probertite.shtml. [Erişim tarihi: 18.11.2024].

[58] Ş. G. Özkan, T. D. Tombal, İ. K. Ünver ve A. E. Osmanlıoğlu, "Bor bileşiklerinin özellikleri, üretimi, kullanımı ve nükleer reaktör teknolojisinde

önemi / Properties, production, uses of boron compounds and their importance in nuclear reactor technology," *Bor Dergisi*, cilt 1, sayı 2, 2016.

[59] R. C. Erd, J. F. Mc Allister ve A. C. Vlisidis, "Nobleite, Another New Hydrous Calcium Borate from The Death Valley Region," *American Mineralogist*, cilt 46, ss. 560-571, 1961.

[60] G. Gündoğmaz, "Bazı Bor İçeren Apatit Malzemelerin Sentezi ve Karakterizasyonu," Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 2007.

[61] D. Şenol Arslan, "Türkiye'de farklı yörelerde bulunan kolemanit minerallerinin fiziksel, kimyasal ve termal özelliklerinin tayini," *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2021. doi: 10.17714/gumusfenbil.931377.

[56] "Kolemanit," Wikipedia, [Çevrimiçi]. Erişim: https://tr.wikipedia.org/wiki/Kolemanit. [Erişim tarihi: 08.07.2024].

[57] "Colemanite," Webmineral, [Çevrimiçi]. Erişim: https://webmineral.com/data/Colemanite.shtml. [Erişim tarihi: 02.09.2024].

[58] "Pandermit," MTA, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/pandermit. [Erişim tarihi: 05.09.2024].

[59] "Priceite," Webmineral, [Çevrimiçi]. Erişim: https://webmineral.com/data/Priceite.shtml. [Erişim tarihi: 18.11.2024].

[60] L. N. Warr, "IMA–CNMNC approved mineral symbols," *Mineralogical Magazine*, cilt 85, sayı 3, 2021. doi: 10.1180/mgm.2021.43.

[61] "Nobleite," RRUFF, [Çevrimiçi]. Erişim: [https://rruff.info/repository/sample/by_minerals/Nobleite_R060847_Sample%20Photo_9332_M.jpg](https://www.google.com/search?q=https://rruff.info/repository/sample/by_minerals/Nobleite_R060847_Sample%2520Photo_9332_M.jpg). [Erişim tarihi: 18.11.2024].

[62] "Nobleite," Webmineral, [Çevrimiçi]. Erişim: https://webmineral.com/data/Nobleite.shtml. [Erişim tarihi: 22.04.2024].

[63] O. Baysal, "Sarıkaya (Kırka) borat yataklarının mineralojik ve jenetik incelenmesi," Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 1972.

[64] Mineral Database, "Mineral Bilgileri ve Resimleri 2036," [Çevrimiçi]. Erişim: http://www.mindat.org. [Erişim tarihi: 18.05.2024].

[65] "Inyoite," Webmineral, [Çevrimiçi]. Erişim: https://webmineral.com/data/Inyoite.shtml. [Erişim tarihi: 16.08.2024].

[66] "Meyerhofferite," Webmineral, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.webmineral.com/data/Meyerhofferite.shtml. [Erişim tarihi: 18.03.2024].

[67] Mineral Database, "Mineral Bilgileri ve Resimleri 47203," [Çevrimiçi]. Erişim: http://www.mindat.org. [Erişim tarihi: 28.09.2024].

[68] H. Chisholm, ed., "Datolite," *Encyclopædia Britannica*, cilt 7, 11. baskı, Cambridge University Press, 1911, s. 846.

[69] "Datolite," Mindat.org, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mindat.org/photo-373423.html. [Erişim tarihi: 20.09.2024].

[70] H. Chisholm, ed., "Danburite," *Encyclopædia Britannica*, cilt 7, 11. baskı, Cambridge University Press, 1911, s. 793.

[71] "Danburite," Mindat.org, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mindat.org/photo-694466.html. [Erişim tarihi: 18.11.2024].

[72] J. Murdoch, "Crystallography and X-ray measurement of howlite from California," *American Mineralogist*, cilt 42, ss. 521–524, 1957.

[73] "Howlite: Howlite mineral information and data," Mindat.org, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mindat.org/min-1943.html. [Erişim tarihi: 11.11.2024].

[74] R. Adams, *Boron, Metallo Boron Compounds and Boranes*, Interscience Publishers, USA, 1964.

[75] DPT, "Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007-2013), Kimya Sanayii Özel İhtisas Komisyonu, Bor Çalışma Grubu Raporu," 2006.

[76] O. Baysal, "Türkiye'de Yeni Bulunan Sulu Magnezyum-Borat Mineralleri: Kurnakovit, İnderit, İnderborit," Ankara, 1972.

[77] "Tunellite," Mindat.org, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mindat.org/photo-1173082.html. [Erişim tarihi: 12.11.2024].

[78] Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, "Bor Sektör Raporu," 2022.

[79] A. V. Karakaş ve M. Yilmaz, "Türkiye'de Bulunan Bor Rezervlerinin Stratejik Açıdan Değerlendirilmesine Yönelik Akademik Algı," *Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, cilt 13, sayı 2, 2022. doi: 10.33537/sobild.2022.13.2.2.

[80] T.C. Kalkınma Bakanlığı, "On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023)," 2019-2023.

[81] E. Ertuğrul, "Bor ve Toryum Madenleri Sektörü, Sektörel Araştırmalar," Türkiye Kalkınma Bankası A.Ş. Araştırma Müdürlüğü, Ankara, 2004.

[82] R. Boncukçuoğlu, M. M. Kocakerim, E. A. Yılmaz ve T. M. Yılmaz, "Bor elementinin çevresel açıdan değerlendirilmesi," Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü, Erzurum, 2003.

[83] N. Bulutçu, "Türkiye'de Bor Bileşikleri Üretim Teknolojisinin Dünü, Bugünü ve Geleceği," *Bor Bileşikleri Üretim Teknolojileri Araştırmaları Danışma Toplantısı*, TÜBİTAK-MAM, Gebze, 1996.

[84] T. Ulvi ve S. Hakan, "Bor Mineralinin Yangın Geciktirici Etkileri," *Yangın ve Yanma Dergisi*, cilt 10, sayı 1, ss. 28-37, 2022.

[85] C. Helvacı, "Bor Yataklarının Genel Değerlendirmesi ve Gelecek Öngörüsü," *Madencilik ve Yer Bilimleri Dergisi, Madencilik Türkiye*, yıl 6, sayı 47, 1 Haziran 2015.

[86] G. Gökçen, "Yerkürenin Bize Armağanı Jeotermal Enerji," *Bilim ve Teknik Dergisi*, cilt 4, sayı 98, ss. 46-49, 2009.

[87] "Türkiye Bor Madeni Haritası," Coğrafya Harita, [Çevrimiçi]. Erişim: http://cografyaharita.com/haritalarim/4fturkiye-bor-madeni-haritasi. [Erişim tarihi: 10.02.2024].

[88] C. Helvacı, "6. Jeokimya Sempozyumu," Sunum, 14-17 Mayıs 2014.

[89] U. Öner, "Türkiye'nin Alternatif Enerji Kaynakları ve Bor Madeninin Endüstride Kullanım Alanlarının Araştırması," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Ticaret Üniversitesi, FBE. Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2007.

[90] Ü. Kurt, "Bor Madenleri Nedir? Nerelerde Kullanılır? Türkiye Ekonomisine Etkileri ve Dünyadaki Yeri," *International Journal of Social Humanities Sciences Research (JSHSR)*. doi: 10.26450/jshsr.3618.

[91] A. YÜCEL, "Dünyadaki Başlıca Bor Yatakları, Üretimi, Pazarlaması ve Türkiye'nin Önemi," Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 2010.

[92] N. Yıldız, "Strateji ve Stratejik Maden," Mart 2003.

[93] C. Helvacı, "Borat yatakları: Maden yataklarına genel bakış ve gelecek tahmini," *J. Boron*, cilt 2, ss. 59–70, 2017.

[94] A. Diemer, E. Nedelciu, M. Schellens ve J. Gisladottir, "Kritik Hammadde Değerlendirmelerinde Sürdürülebilirliğin Zorlukları," *Uluslararası J. Manag. Güç vermek*, cilt 7, ss. 156–179, 2018.

[95] Y. Jin, J. Kim ve B. Guillaume, "Kritik malzeme çalışmalarının gözden geçirilmesi," *Kaynak. Koru. Geri dönüşüm*, cilt 113, ss. 77–87, 2016.

[96] M. L. C. M. Henckens, P. P. J. Driessen ve E. Worrell, "Metal kıtlığı ve sürdürülebilirlik, kıt metallerin çıkarılmasının azaltılması gerekliliğini analiz ediyor," *Kaynak. Koru. Geri dönüşüm*, cilt 93, ss. 1–8, 2014.

[97] M. Zhu, X. Zhou, H. Zhang, L. Wang ve H. Sun, "International trade evolution and competition prediction of boron ore: Based on complex network and link prediction," *Resources Policy*, cilt 82, 2023. doi: 10.1016/j.resourpol.2023.103542.

[98] A. Zengin, B. Aka, S. Gençay ve M. Uzun, "Bor Madeninin Endüstriyel Uygulamaları," *European Journal of Science and Technology*. doi: 10.31590/ejosat.919451.

[99] A. Morkan, E. Gul, İ. Morkan ve G. Kahveci, "Effect of magnesium source on the fabrication of kotoite Mg3B2O6 ceramic," *International Journal of Applied Ceramic Technology*, cilt 15, sayı 6, 2018. doi: 10.1111/ijac.13024.

[100] "2. Uluslararası Bor Sempozyumu Bildirileri 23-25 Eylül 2004 Eskişehir Türkiye," 2004, ss. 133-138.

[101] C. A. Wilkie ve A. B. Morgan, *Fire Retandancy of Polymeric Materials. 2nd Ed.*, CRC Press, USA, ss. 1-349.

[102] O. Baysal, "Türkiye'de Yeni Bulunan Sulu Magnezyum-Borat Mineralleri: Kurnakovit, İnderit, İnderborit," *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, cilt 80, sayı 80, ss. 89-99, 1973.

[103] "Inderite," Mindat.org, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mindat.org/photo-1120379.html. [Erişim tarihi: 11.11.2024].

[104] "Bor ve Bileşikleri Kimyada Sektör Araştırması," Türkiye Sınai Kalkınma Bankası, Ankara, 1980.

[105] "Kurnakovite," Mindat.org, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mindat.org/photo-237321.html. [Erişim tarihi: 18.10.2024].

[106] "Kurnakovite," Webmineral, [Çevrimiçi]. Erişim: https://webmineral.com/data/Kurnakovite.shtml. [Erişim tarihi: 18.11.2024].

[107] H. Staute, "Pinnoit, ein neues Borat von Stassfurt," *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, cilt 17, ss. 1584-1586, 1884.

[108] "Pinnoite," Mindat.org, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mindat.org/photo-917150.html. [Erişim tarihi: 10.07.2024].

[109] E. Sarıhan, "Bor Sektör Profili," İstanbul Ticaret Odası, 2006.

[110] "Admontite," Mindat.org, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mindat.org/min-27.html. [Erişim tarihi: 15.11.2024].

[111] E. Ay, "Bazı Magnezyum Boratlı Bileşiklerin Katı-Hal Kimyasal Yöntemlerle Sentezlenmesi ve Karakterizasyon Çalışmaları," Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2006.

[112] "Mineral Bilgileri," Webmineral, [Çevrimiçi]. Erişim: http://www.webmineral.com/. [Erişim tarihi: 27 Şubat 2014].

[113] Ş. Marincea, "Suanite in two boron-bearing magnesian skarns from Romania: data on a longtime ignored mineral species," *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, cilt 182, sayı 2, ss. 183–192, 2006. doi: 10.1127/0077-7757/2006/0041.

[114] "Suanite," Mindat.org, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mindat.org/min-3818.html. [Erişim tarihi: 01.08.2024].

[115] "Suanite," Webmineral, [Çevrimiçi]. Erişim: https://webmineral.com/data/Suanite.shtml. [Erişim tarihi: 01.08.2024].

[116] Y. Banno, K. Momma, R. Miyawaki ve M. Bunno, "New data on S-bearing katoite from Tadano, Fukushima Prefecture, Japan: an implication of the presence of both (SO3)2- and (SO4)2- in the garnet structure," *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, cilt 118, sayı 1, 2023.

[117] "Katoite," Mindat.org, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mindat.org/photo-1198183.html. [Erişim tarihi: 18.11.2024].

[118] Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, "Borun Tarihçesi," [Çevrimiçi]. Erişim: 17.10.2024.

[119] "Boracite," Mindat.org, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mindat.org/photo-1141723.html. [Erişim tarihi: 11.04.2024].

[120] "Mineral Bilgileri," Webmineral, [Çevrimiçi]. Erişim: http://www.webmineral.com/. [Erişim tarihi: 12.10.2024].

[121] "Shabynite," Mindat.org, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mindat.org/photo-63117.html. [Erişim tarihi: 17.10.2024].

[122] W. L. Roberts, T. J. Campbell ve G. R. Rapp, Jr., "Karlite," *Encyclopedia of Minerals*, 2. baskı, Springer, 1990.

[123] "Karlite," Mindat.org, [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mindat.org/min-2160.html. [Erişim tarihi: 22.06.2024].

[124] "2. Uluslararası Bor Sempozyumu Bildirileri 23-25 Eylül 2004 Eskişehir Türkiye," 2004, ss. 133-138.

[125] G. Yang ve S. J. Park, "Conventional and microwave hydrothermal synthesis and application of functional materials: A review," *Materials*, cilt 12, sayı 7, 2019. doi: 10.3390/ma12071177.

[126] L. Zhihong ve H. Mancheng, "Synthesis and Thermochemistry of MgO·3B2O3.3.5H2O," *Thermochimica Acta*, cilt 403, ss. 181-184, 2003.

[127] N. Sano, Y. Ikeyama ve H. Tamon, "Hydrothermal synthesis of magnesium boride nanotubes," *Materials Letters*, cilt 85, 2012. doi: 10.1016/j.matlet.2012.06.069.

[128] A. S. Kipcak, F. T. Senberber, E. M. Derun ve S. Piskin, "Reuse of magnesium wastes in hydrothermal synthesis of a magnesium borate mineral: Admontite," *Environmental Engineering and Management Journal*, cilt 17, sayı 3, 2018. doi: 10.30638/eemj.2018.054.

[129] W. Zhu, G. Li, Q. Zhang, L. Xiang ve S. Zhu, "Hydrothermal Mass Production of MgBO2(OH) Nanowhiskers and Subsequent Thermal Conversion to Mg2B2O5 Nanorods For Biaxially Oriented Polypropylene Resins Reinforcement," *Powder Technology*, cilt 203, ss. 265-271, 2010.

[130] J. Srivind, V. S. Nagarethinam, M. Suganya, S. Balamuruğan, D. Prabha ve A. R. Balu, "Rodamin B (Katyonik) ve Kongo Kırmızısı (Aniyonik) Boyaların Bozunmasına Karşı SnS2-CdO Nanokompozitinin Görünür Işık Işınlı Fotokatalitik Performansı," *Anne. bilim Müh. B Katı Hal Malzemesi. Av. Teknoloji*, cilt 255, 2020, madde 114530.

[131] D. Mara, *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*, 2013. doi: 10.4324/9781849771023.

[132] E. Friedler, D. Butler ve Y. Alfiya, "Atık Su Bileşimi, Atık Su Yönetimi için Kaynak Ayrımı ve Yerelleştirme," IWA Publishing, Londra, Birleşik Krallık, 2013, ss. 241–257.

[133] F. Pedrero, I. Kalavrouziotis, J. J. Alarcón, P. Koukoulakis ve T. Asano, "Sulu tarımda arıtılmış belediye atık sularının kullanımı. İspanya ve Yunanistan'daki bazı uygulamaların gözden geçirilmesi," *Agric. Su Yönetimi*, cilt 97, ss. 1233–1241, 2010.

[134] F. A. E. Evans, J. Mateo-Sagasta, M. Qadir, E. Boelee ve A. Ippolito, "Tarımsal su kirliliği: temel bilgi boşlukları ve araştırma ihtiyaçları," *Curr. görüş. çevre. Sürdürülebilirlik.*, cilt 36, ss. 20–27, 2019.

[135] E. D. Ongley, "Tarımdan Kaynaklanan Su Organizasyonu Kirliliğinin Kontrolü," Gıda ve Tarım Örgütü, 1996.

[136] J. Vymazal, "The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater," *Ecological Engineering*, cilt 35, sayı 1, 2009. doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.08.016.

[137] R. Munter, "Endüstriyel Atıksu Özellikleri," Baltık Üniversitesi Programı (BUP), İsveç, 2003, ss. 185–194.

[138] A. Azimi, A. Azari, M. Rezakazemi ve M. Ansarpour, "Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewaters: A Review," *ChemBioEng Reviews*, cilt 4, sayı 1, 2017. doi: 10.1002/cben.201600010.

[139] F. Fu ve Q. Wang, "Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review," *Journal of Environmental Management*, cilt 92, sayı 3, 2011. doi: 10.1016/j.jenvman.2010.11.011.

[140] J. Kern, W. Reimann ve O. Schlüter, "Treatment of recycled carrot washingwater," *Environmental Technology*, cilt 27, sayı 4, 2006. doi: 10.1080/09593332708618656.

[141] F. O. Kocaer ve U. Alkan, "Boyar madde içeren tekstil atiksularinin aritim alternatifleri," *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 7, sayı 1, 2002.

[142] K. Socha, "Treatment of Textile Effluents," *Textile Month*, cilt 12, ss. 52-56, 1991.

[143] T. Robinson, G. McMullan, R. Marchant ve P. Nigam, "Remediation of Dyes in Textile Effluent: A Critical Rewiev on Current Treatment Technologies with a Proposed Alternative," *Bioresource Technology*, cilt 77, ss. 247-255, 2001.

[144] Y. M. Slokar ve A. M. Le Marechal, "Methods of Decoloration of Textile Wastewaters," *Dyes and Pigments*, cilt 37, sayı 4, ss. 335-356, 1998.

[145] G. Han, Y. Du, Y. Huang, W. Wang, S. Su ve B. Liu, "Sulu çözeltilerden tehlikeli Kongo kırmızısının şelasyon flokülasyon ve çökeltme flotasyon prosesi ile uzaklaştırılması üzerine çalışma," *Chemosphere*, cilt 289, 2022, madde 133109. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133109.

[146] K. Manor, M. Batool, F. Naz, M. F. Nazar, B. H. Hameed ve M. N. Zafar, "Kongo kırmızısı gideriminde bitki bazlı biyoadsorbanların uygulanmasına ilişkin kapsamlı bir inceleme," *Biyokütle Dönüşümleri Biyorafineri*, 2022, ss. 1-27. doi: 10.1007/s13399-022-02741-5.

[147] C. Luo, D. Wu, L. Gan, X. Cheng, Q. Ma, F. Tan, J. Gao, W. Zhou, S. Wang ve F. Zhang, "Kongo kırmızısının termal olarak aktive edilen persülfat işlemiyle oksidasyonu: kinetik ve dönüşüm yolu," *Sep. Purif. Technol.*, cilt 244, 2020, Makale 116839. doi: 10.1016/j.seppur.2020.116839.

[148] I. Sabah ve A. I. Alwared, "Akışkan yataklı bir reaktörde sulu çözeltiden buğday kabuğuna Kongo kırmızısı boyanın adsorpsiyonu," *Irak Kimya Dergisi, Pet. Eng.*, cilt 20, sayı 4, ss. 55-60, 2019. doi: 10.31699/IJCPE.2019.4.9.

[149] A. Karargah Ali ve A. A. Muhammed, "Eichhornia crassipes kullanılarak sulu çözeltiden Kongo kırmızısı boyalarının giderilmesi," *Irak Kimya Dergisi, Pet. Eng.*, cilt 21, sayı 4, ss. 21-32, 2020. doi: 10.31699/IJCPE.2020.4.3.

[150] A. Suhaimi, E. Mahmoudi, K. S. Siow, A. W. Mohammad ve M. F. Mohd Razip Wee, "Anyonik boyanın (Kongo kırmızısı) uzaklaştırılması için PES membranında heptilaminin plazma polimerizasyonu ile azot dahil edilmesi," *Uluslararası Çevre Bilimi ve Teknolojisi Dergisi*, cilt 18, 2021, ss. 1443-1452. doi: 10.1007/s13762-020-02879-7.

[151] L. Malado-Larios, R. Mayen-Mondragón, R. D. Martínez-Orozco, U. Páramo-García, N. V. Gallardo-Rivas ve R. García-Alamilla, "Kongo

kırmızısının sulu atık sularda elektroremediasyonu için titanyum dioksit/polianilin nanokompozit filmlerinin elektrokimyasal olarak desteklenen üretimi," *Sentez Met.*, cilt 268, 2020, Makale 116464. doi: 10.1016/j.synthmet.2020.116464.

[152] T. Ngulube, J. Ray, V. Masindi ve A. Maity, "Sentetik boyaların kil bazlı mineraller üzerine adsorpsiyonu hakkında bir güncelleme: son teknoloji bir inceleme," *J. Çevre. Yönetim*, cilt 191, ss. 35-57, 2016.

[153] J. Van Hulse, T. M. Khoshgoftaar ve A. Napolitano, "Experimental perspectives on learning from imbalanced data," *Proceedings of the 24th international conference on Machine learning*, ACM, 2007, ss. 935–942.

[154] F. Xing ve L. Yang, "Robust nucleus/cell detection and segmentation in digital pathology and microscopy images: A comprehensive review," *IEEE reviews in biomedical engineering*, cilt 9, ss. 234–263, 2016.

[155] P. Garg, M. Gupta, L. Singh, R. Mullick ve B. Nigam, "Ocular Biometric Factors and its Association with Intraocular Pressure," *Journal of Clinical & Experimental Ophthalmology*. doi: 10.4172/2155-9570.1000763.

[156] S. Madan, R. Shaw, S. Tiwari ve S. K. Tiwari, "Adsorption dynamics of Congo red dye removal using zno functionalized high silica zeolitic particles," *Appl. Surf. Sci.*, cilt 487, ss. 907-917, 2019.

[157] R. Lafi, I. Montasser ve A. Hafiane, "Adsorption of congo red dye from aqueous solutions by prepared activated carbon with oxygen-containing functional groups and its regeneration," *Adsorption Science and Technology*, cilt 37, sayılar 1–2, 2019. doi: 10.1177/0263617418819227.

[158] M. Clark, *Handbook of Textile and Industrial Dyeing: Principles, Processes and Types of Dyes*, cilt 1, 2011. doi: 10.1533/9780857093974.

[159] D. Saini, R. Aggarwal, A. K. Sonker ve S. K. Sonkar, "Photodegradation of Azo Dyes in Sunlight Promoted by Nitrogen-Sulfur-Phosphorus Codoped Carbon Dots," *ACS Applied Nano Materials*, cilt 4, sayı 9, 2021. doi: 10.1021/acsanm.1c01810.

[160] M. A. Abdelwahab, S. M. El Rayes, M. M. Kamel ve E. A. Abdelrahman, "Orange G ve Metilen Mavisi Boyalarının Etkili Fotokatalitik Parçalanması için Yeni Nanokompozitler Olarak Analsim Nanoparçacıklarında NiS ve ZnS'nin Kapsüllenmesi," *Int. J. Çevre. Anal. kimya*, 2022, ss. 1–18.

[161] D. Sasmal, J. Maity, H. Kolya ve T. Tripathy, "Study of Congo red dye removal from its aqueous solution using sulfated acrylamide and N, N-dimethyl acrylamide grafted amylopectin," *J. Water Process. Eng.*, cilt 18, ss. 7-19, 2017.

[162] M. Dadi ve M. Yasir, "Spectroscopy and Spectrophotometry: Principles and Applications for Colorimetric and Related Other Analysis," *Colorimetry*, 2022. doi: 10.5772/intechopen.101106.

[163] M. Said, W. T. Rizki, W. R. Asri, D. Desnelli, A. Rachmat ve P. L. Hariani, "SnO2–Fe3O4 nanocomposites for the photodegradation of the Congo red dye," *Heliyon*, cilt 8, sayı 4, 2022. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09204.

[164] H. Zhu, R. Jiang, L. Xiao, Y. Chang, Y. Guan, X. Li ve G. Zeng, "Photocatalytic decolorization and degradation of Congo Red on innovative

crosslinked chitosan/nano-CdS composite catalyst under visible light irradiation," *Journal of Hazardous Materials*, cilt 169, sayılar 1–3, 2009. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.04.037.

[165] R. Ediati, L. L. Zulfa, I. Maulidah, D. O. Sulistiono, H. Fansuri, A. Rosyidah, F. Martak, D. Hartanto, M. A. B. Abdullah, W. P. Utomo, E. N. Kusumawati ve M. Shirai, "Addition of graphene oxide to ZIF-8/HKUST-1 composite for enhanced adsorptive and photocatalytic removal of congo red in wastewater," *South African Journal of Chemical Engineering*, cilt 46, 2023. doi: 10.1016/j.sajce.2023.07.006.

[166] M. M. Asaad Mahdi, M. A. Farhan, Z. H. Mahmoud, A. Mahdi Rheima, Z. sabri Abbas, M. M. Kadhim, A. dhari jawad al-bayati, A. Salam Jaber, S. K. Hachim ve A. Hussain Ismail, "Direct sunlight photodegradation of congo red in aqueous solution by TiO2/rGO binary system: Experimental and DFT study," *Arabian Journal of Chemistry*, cilt 16, sayı 8, 2023. doi: 10.1016/j.arabjc.2023.104992.

[167] R. S. Brishti, M. Ahsan Habib, M. H. Ara, K. M. Rezaul Karim, M. Khairul Islam, J. Naime, M. M. Hasan Rumon ve M. A. Rayhan Khan, "Green synthesis of ZnO NPs using aqueous extract of Epipremnum aureum leave: Photocatalytic degradation of Congo red," *Results in Chemistry*, cilt 7, 2024. doi: 10.1016/j.rechem.2024.101441.

[168] N. Ali, A. Said, F. Ali, F. Raziq, Z. Ali, M. Bilal, L. Reinert, T. Begum ve H. M. N. Iqbal, "Photocatalytic Degradation of Congo Red Dye from Aqueous Environment Using Cobalt Ferrite Nanostructures: Development, Characterization, and Photocatalytic Performance," *Water, Air, and Soil Pollution*, cilt 231, sayı 2, 2020. doi: 10.1007/s11270-020-4410-8.

[169] K. Kaviyarasu, A. Mariappan, K. Neyvasagam, A. Ayeshamariam, P. Pandi, R. R. Palanichamy, C. Gopinathan, G. T. Mola ve M. Maaza, "Photocatalytic performance and antimicrobial activities of HAp-TiO2 nanocomposite thin films by sol-gel method," *Surfaces and Interfaces*, cilt 6, 2017. doi: 10.1016/j.surfin.2016.10.002.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Ak, B., Gül, E. M., Şenberber Dumanlı, F. T., Kıpçak, A. S., & Derun, E. (2023). Evaluation of Hydrothermal Production of Magnesium Borate Samples in the Treatment of Industrial Dyes from Wastewater. In *6th International Eurasian Conference on Biological and Chemical Sciences (EurasianBioChem 2023)* (ss. 1145-1150). Ankara, Turkey.