



**HURMA DALI ATIĞININ PİROLİZİNDEN ELDE
EDİLEN BİYOÇARIN ADSORPSİYON İLE SULU
ÇÖZELTİDEN MALAHİT YEŞİLİ BOYASININ
UZAKLAŞTIRILMASINDA KULLANIMI**

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ**

Safa Abdulmahdi SHAKIR

**Tez Danışmanları
Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL
Dr. Öğr. Üyesi Sedef ŞİŞMANOĞLU**

**HURMA DALI ATIĞININ PİROLİZİNDEN ELDE EDİLEN BİYOÇARIN
ADSORPSİYON İLE SULU ÇÖZELTİDEN MALAHİT YEŞİLİ BOYASININ
UZAKLAŞTIRILMASINDA KULLANIMI**

Safa Abdulmahdi SHAKIR

**Tez Danışmanları
Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL
Dr. Öğr. Üyesi Sedef ŞİŞMANOĞLU**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2024**

Safa Abdulmahdi SHAKIR tarafından hazırlanan “HURMA DALI ATIĞININ PİROLİZİNDEN ELDE EDİLEN BİYOÇARIN ADSORPSİYON İLE SULU ÇÖZELTİDEN MALAHİT YEŞİLİ BOYASININ UZAKLAŞTIRILMASINDA KULLANIMI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL
Tez Danışmanı, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Sedef ŞİŞMANOĞLU
Tez Danışmanı, Kimya Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 26/06/2024

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Şükrü DURSUN (KTÜN)	Online
Üye : Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL (KBÜ)
Üye : Prof. Dr. Ertuğrul ERDOĞMUŞ (BARÜ)	Online
Üye : Prof. Dr. Mehmet Kuddusi AKALIN (KBÜ)
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Sedef ŞİŞMANOĞLU

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Safa Abdulmahdi SHAKIR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

**HURMA DALI ATIĞININ PİROLİZİNDEN ELDE EDİLEN BİYOÇARIN
ADSORPSİYON İLE SULU ÇÖZELTİDEN MALAHİT YEŞİLİ BOYASININ
UZAKLAŞTIRILMASINDA KULLANIMI**

Safa Abdulmahdi SHAKIR

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları:

Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL

Dr. Öğr. Üyesi Sedef ŞİŞMANOĞLU

Haziran 2024, 76 sayfa

Bu çalışmada, Irak'tan temin edilen hurma dalı atıkları, bir reaktörde 400°C'de piroliz edilmiş ve daha sonra elde edilen biyoçarın aktivasyonu, H₃PO₄ çözeltisiyle empenye edilerek mikrodalgada ısıtılması ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, hurmadan elde edilen biyoçar ve fosfatlı aktifleştirilmiş biyoçar adsorplayıcılarının 25°C'de malahit yeşili (MY) üzerindeki adsorpsiyon yeteneklerini incelenmiştir. Analiz için çeşitli izoterm modelleri arasında Freundlich, Langmuir, Temkin, Fowler-Frumkin-Guggenheim (FFG), Dubinin-Radushkevich (D-R) ve Flory-Huggins (F-H) kullanılmıştır. Freundlich izoterminden elde edilen sonuçlar, tüm test edilen adsorplayıcılar için adsorpsiyon açısından en uygunu olduğu ve biyoçar, hurma atığı ve fosfatla aktifleştirilmiş biyoçar için sırasıyla 6,82 mg/g, 6,93 mg/g ve 1,1 mg/g olan K_F değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Langmuir izotermi, için ise

yine aynı sırayla değişen q_{max} değerlerini (334 mg/g, 125 mg/g ve 32 mg/g) göstermiştir ve bu, D-R bulgularıyla da uyumlu olduğu bulunmuştur. Temkin izotermi, D-R enerji sonuçlarıyla uyumlu olarak fiziksel adsorpsiyonu önermiştir. FFG analizi, adsorplayıcılar arasında farklı termodinamik özellikler ortaya koymuştur. FTIR/ATR ve SEM analizleri, izoterm verilerini doğrulayarak, bu adsorplayıcıların doğal pH'ında pH ayarı olmadan atık suyun içinden MG'nin etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını teyit etmiştir ve bu nedenle bu adsorplayıcıların MG'nin atık sulardan uzaklaştırılması için uygunluğunu vurgulamıştır. Çalışma, biyoçarların yüzey modifikasyonlarının iyileştirilmesi yoluyla adsorpsiyon kapasitelerini artırmak için gelecek araştırmaları önermektedir.

Anahtar Sözcükler : Adsorpsiyon, hurma dalı atığı, malahit yeşili, Piroliz, Biyoçar.

Bilim Kodu : 90322

ABSTRACT

Master Thesis

THE USE OF BIOÇAR OBTAINED FROM THE PYROLYSIS OF PALM DATE BRANCH WASTE IN THE REMOVAL OF MALAHİTE GREEN DYE FROM AQUEOUS SOLUTION BY ADSORPTION

Safa Abdulmahdi SHAKIR

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Environmental Engineering

Thesis Advisors:

Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL

Assist. Prof. Dr. Sedef ŞİŞMANOĞLU

June 2024, 76 pages

In this study, date palm fronds sourced from Iraq underwent pyrolysis at 400°C in a reactor, with subsequent bioçar activation achieved by immersing bioçar in an H₃PO₄ solution. The research investigated the adsorption capabilities of date palm, bioçar derived from date palm, and phosphatised çar adsorbents on malahite green (MG) at 25°C. Various isotherms including Freundlich, Langmuir, Temkin, Fowler-Frumkin-Guggenheim (FFG), Dubinin-Radushkevich (D-R), and Flory-Huggins (F-H) were utilized for analysis. The results from the Freundlich isotherm favored adsorption for all tested adsorbents, with respective K_F values of 6.82 mg/g, 6.93 mg/g, and 1.1 mg/g. Langmuir isotherm indicated varying q_{max} values of 334 mg/g, 125 mg/g, and 32 mg/g for bioçar, date palm, and phosphated çar, respectively, aligning with D-R findings. Temkin isotherm suggested physical adsorption, consistent with D-R energy results. FFG analysis revealed differing thermodynamic çaracteristics among the adsorbents. FTIR/ATR and SEM analyses corroborated the isotherm data,

affirming the efficient removal of malahite green from wastewater at its natural pH without pH adjustment, thus highlighting the suitability of these adsorbents. The study proposes future research to enhance adsorption capacities through improved surface modifications of bioçars.

Key Word : Adsorption, Date palm frond, malahite green, pyrolysis, bioçar.

Science Code : 90322

TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın hazırlanmasında, bana büyük destek ve rehberlik eden çok değerli hocam Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL'a en içten teőekkürlerimi sunarım. Ayrıca, yardımlarını ve katkılarını esirgemeyen sayın hocalarım Prof. Dr. Mehmet Kuddusi AKALIN ve Dr. Öğr. Üyesi Sedef ŞİŞMANOğLU'na da sonsuz teőekkürlerimi iletmek isterim.

Gerçek aŐkın anlamını bana öğreten, benim iki yıldızım, mutluluğum ve dünyam olan Tara ve Talya'ya; her zaman bana inanan ve destekleyen rol modellerim olan anne ve babama; en büyük destekçim, sadık ve sevgili eŐim Muhammed'e; ikinci annem olan, en iyi doktorum Rana'ya; kahramanım ve kardeŐim Zaid'e; en iyi arkadaŐım ve ruh eŐim Marwa'ya; güç aldığım yeğenlerim Ali, Dima, Yousif, Taha, Dania, Meena, Majd, Diana, Mass'a; her zaman yanımda olan kardeŐim Yahia'ye teşekkür ederim.

Bu alıőmayı KBÜBAP-22-DS-148-No'lu proje ile maddi olarak destekleyen Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	6
BİYOÇAR'IN ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİ	6
2.1. BİYOKÜTLE	6
2.2. PİROLİZ.....	7
2.3. MİKRODALGA PİROLİZ	8
2.4. BİYOÇAR.....	9
2.4.1. Biyoçarın Özellikleri	10
2.4.2. Biyoçarın Aktivasyonu	11
2.4.3. Biyoçarın Sulu Çözeltilerden Kirleticilerin Giderilmesinde Kullanımı .	12
BÖLÜM 3	14
ADSORPSİYONUN MEKANİZMASI	14
3.1. ADSORPSİYON PRENSİPLERİ VE SÜRECİ.....	15
3.2. ADSORPSİYONUN ETKİN FAKTÖRLERİ	17
3.3. ADSORPSİYON TÜRLERİ	18
3.3.1. Fiziksel Adsorpsiyon	18

	<u>Sayfa</u>
3.3.2. Kimyasal Adsorpsiyon.....	18
3.3.3. İyon Değişimi	19
3.3.4. Spesifik Olmayan Adsorpsiyon	19
3.4. Adsorpsiyonun Uygulamaları.....	20
3.4.1. Su ve Hava Arıtımı	20
3.4.2. Kimyasal Bileşiklerin Ayrılması	20
3.5. Doğal ve Sentetik Adsorplayıcılar	21
BÖLÜM 4	23
HURMA BİYOKÜTLESİ VE MALAHİT YEŞİLİ BOYASI HAKKINDA BİLGİ	23
4.1. HURMA BİYOKÜTLESİ.....	23
4.2. MALAHİT YEŞİLİ.....	25
BÖLÜM 5	26
LİTERATÜR TARAMASI.....	26
5.1. ÇEŞİTLİ BİYOABSORBENTLER İLE MALAHİT YEŞİLİN UZAKLAŞTIRILMASINA İLİŞKİN ÇALIŞMALARIN KARŞILAŞTIRILMASI	26
BÖLÜM 6	39
MATERYAL VE METOD	39
6.1. HAMMADDE TEMİNİ VE KARAKTERİZASYONU	39
6.2. BİYOÇAR HAZIRLIĞI.....	39
6.3. MİKRODALGA DESTEKLİ PİROLİZ YOLUYLA BİYOÇAR AKTİVASYONU	40
6.4. ADSORPSİYON ÇALIŞMALARI.....	40
6.5. ADSORPSİYON İZOTERMLERİ	43
BÖLÜM 7	45
BULGULAR VE TARTIŞMA	45
7.1. HURMA DALI (DPF), HURMA DALI BİYOÇARI (DPC) VE AKTİVE EDİLMİŞ BİYOÇAR (DPMW) 'NİN KARAKTERİZASYONU.....	45

	<u>Sayfa</u>
7.2. ADSORPSİYON DENEYLERİ.....	49
7.2.1. İzoterm Şekli.....	49
7.2.2. Adsorpsiyon İzotermi	50
BÖLÜM 8	53
SONUÇLAR	53
KAYNAKLAR	55
Tezden çıkan yayınlar	75
ÖZGEÇMİŞ	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Adsorpsiyon mekanizması	14
Şekil 3.2. Yüzey Fenomeni (https://scienceinfo.com/adsorption-its-types-and-applications/).	16
Şekil 3.3. Katı bir adsorplayıcı üzerine adsorpsiyonun üç temel adımdan oluşur (Akdut, 2015)	17
Şekil 3.4. Adsorpsiyon Türleri Kaynak: (https://mme.deu.edu.tr/wp-content/uploads/2017/07/YuZEYKiMYASIDERS.pdf).	19
Şekil 4.1. Malahit Yeşili'nin moleküler yapısı (Sismanoglu vd., 2023)	25
Şekil 6.1. Adsorpsiyon deneysel sürecinin şeması.(Sismanoglu vd, 2023)	41
Şekil 6.2. Adsorplanan ve adsorplayıcı arasındaki adsorpsiyon mekanizmasının şeması. (Khan vd., 2023; Sismanoglu vd, 2023)	42
Şekil 6.3. ce (ppm)'e karşılık zaman grafiği DPF (a), DPC (b), DPMW (c).	42
Şekil 6.4. Biyosorban (DPF, DPC, DPMW) doz-malahit yeşili giderimi (%).	43
Şekil 6.5. pH-malahit yeşili giderimi (%).	43
Şekil 7.1. DPF (a), DPC (b), DPMW (c) FTIR/ATR spektrumları.	45
Şekil 7.2. DPF'nin (a), DPF-MG'nin (b), DPC'nin (c), DPC-MG'nin (d), DPMW'nin (e) ve DPMW-MG'nin (f) SEM mikrografik görüntüleri.	47
Şekil 7.3. DPF (a), DPC (c), DPMW'nin TGA eğrileri; adsorpsiyon öncesi ve sonrası DPF (b), DPC (d), DPMW'nin DTG eğrileri (e).	48
Şekil 7.4. DPF (a), DPC (b), DPMW (c) Giles izoterm tipleri.	49

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1. Çeşitli biyosorbanlarla malahit yeşilinin uzaklaştırılması üzerine çalışmaların karşılaştırılması.	5
Tablo 6.1. Adsorpsiyon izotermi açıklaması.	44
Tablo 7.1. DPF-MG, DPC-MG ve DPMW-MG'nin izoterm verileri.	50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

N	: azot
O	: oksijen
H	: hidrojen
Q_e	: Adsorption Capacity
BC	: Bioçar
g	: Gram
g/L	: Litre Başına Gram
g/mol	: Mol Başına Gram
Q_{max}	: Maksimum Adsorpsiyon Miktarı
cm^{-1}	: Dalga sayısı
%	: Yüzde
mL	: Mililitre
R^2	: Doğrusal Korelasyon
L	: Litre
cm	: Santimetre

KISALTMALAR

- FESEM : Field Emission Scanning Electron Microscopy (Alan Emisyonu Taramalı Elektron Mikroskopisi)
- EDX : Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağılımı X-Işını Spektroskopisi)
- XRD : X-ray Diffraction Analysis (X-ışını Kırınımı Analizi)
- BET : Brunauer-Emmett-Teller
- FTIR/ATR: Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Azaltılmış Toplam Reflektans Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi)
- UV-Vis : Visible and Ultraviolet Spectroscopy (UV-Görünür Blge Spektroskopisi)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Atık su içerisinde bulunan boya, sucul çevre kirliliğiyle ilgili en büyük sorunlardan biridir (Almarri, 2023; Li BeiBei vd., 2018; Ramesh vd., 2023). Tekstil, kağıt, plastik, deri, kozmetik ve diğer sektörlerden kaynaklanan boya kirliliği, çevre ve canlılar üzerinde kritik bir etkiye sahiptir (Kamel vd., 2023). Malahit yeşili (MG) gibi sentetik boyalar, hem insanlar hem de hayvanlar üzerinde ciddi mutajenik, kanserojenik ve teratojenik etkiler oluşturabilir (Lima vd., 2017). Bir boyanın sulu ortamda varlığı, sınırlı ışık penetrasyonu nedeniyle çok düşük konsantrasyonlarda bile tespit edilebilir ve bu durum sucul türler üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir (Gümüş, 2022; Ramesh vd., 2023). MG; pamuk, jüt, kağıt, ipek, yün ve deri boyamada yaygın olarak kullanılan suda çözünen katyonik bir boya olup, trifenilmetan sınıfına aittir. MG; gıda zincirine girebilir ve doğrudan temas, yutma veya soluma yoluyla insanlara ve sucul yaşama zarar verebilir. Bu nedenle, endüstriyel atıksulardan bu tür sentetik boyaların sucul ortama salınmadan önce uzaklaştırılması günümüz dünyasında gereklidir (Bhagavathi Pushpa vd., 2015a; Daneshvar vd., 2007). Koagülasyon, filtrasyon, elektroflotasyon, ileri oksidasyon, enzimatik tedavi, adsorpsiyon, fotokataliz, biyoremediasyon vd., gibi çeşitli arıtma teknikleri, boyaların sulu ortamdan uzaklaştırılması için kullanılmaktadır (Jabbar vd., 2022; Lima vd., 2017; Park vd., 2019; Yan vd., 2021). Bunlar arasında, adsorpsiyon, uygun maliyetli ve çevre dostu olduğu için boyaların sucul ortamdan uzaklaştırılması için umut verici bir tekniktir (Meng vd., 2023; Nguyen vd., 2023a). İnorganik adsorplayıcılar ör. TiO_2 (Ali, Kalash vd., 2022), Co/MCM-41 (Khadim vd., 2022), MCM-48 (Ali vd., 2023), nFe^0 ve SC- nFe^0 (Kadhun vd., 2021), TiO_2 /Kaolin (Abbood vd., 2023), SBA-15 (Ali, Alismaeel vd., 2022)) kullanılarak yapılan adsorpsiyon çalışmalarına ek olarak, organik adsorplayıcılar (ör. patlıcan kabuğu (Al-Jaaf vd., 2022), aktif karbon (Al-Khodor & Albayati, 2023) veya şeker kamışı (A. Khan vd., 2023a), yer fıstığı kabuğu (Ishtiaq vd., 2020; Khalid vd., 2021),

okaliptus kabuğu (Zafar vd., 2022a)) gibi organik bitki atıkları kullanılarak oluşturulan kompozit malzemelerde adsorplayıcı olarak etkin bir şekilde kullanılmıştır. Toksik maddelerin arıtımı için umut verici bir adsorplayıcı olarak biyoçar, yüksek mikroporozite ve yüzey alanı, bol miktarda oksijen fonksiyonel grubu ve yüksek iyon değişim kapasitesi gibi birkaç ayırt edici özelliğe sahiptir (Braghiroli vd., 2018; Zhang vd., 2017a, 2017b; Zubair vd., 2020a). Diğer bildirilen adsorplayıcılarla karşılaştırıldığında, bu özel özellikler, çeşitli kirleticilerin etkin bir şekilde uzaklaştırılması için çok avantajlı, ekonomik ve çevre dostu bir malzeme olarak biyoçar'ı doğrulamaktadır (Zubair vd., 2020b). Biyoçar kullanılarak kirleticilerin uzaklaştırılması, gözenek doldurma, yüzey sorpsiyonu, elektrostatik etkileşim ve iyon değişimi gibi mekanizmaların kombinasyonunu içerir (Abbas vd., 2018), ve literatürde MG'nin uzaklaştırılması için biyoçar'ın kullanıldığı çeşitli çalışmalar vardır (Bhagavathi Pushpa vd., 2015b; Eltaweil vd., 2020; Giri vd., 2022; Leng vd., 2015; Mosebolatan Jabar & Odusote, tarihsiz; Vyavahare vd., 2018). Biyoçar, biyokütlenin termokimyasal dönüşümünden elde edilen gözenekli karbonlu bir malzemedir (Moreira vd., 2017). Biyoçar, karbonizasyon, piroliz veya biyokütlenin gazlaştırılması gibi çeşitli tekniklerle üretilir (Patra vd., 2021a). Piroliz, biyoçar elde etmenin en yaygın ve ekonomik yöntemlerinden biridir. Pirolizde biyokütle, tipik olarak 300 ile 800°C arasında ısıtılır; biyoçar'ın verimi ve özellikleri, piroliz sıcaklığı, ısıtma hızı ve bekleme süresi gibi proses parametrelerine bağlıdır (Y. Li vd., 2020; Sajjadi vd., 2019). Biyoçar'ın adsorpsiyon kapasitesi, yüzey alanı, gözenek boyutu dağılımı, fonksiyonel gruplar ve katyon değişim kapasitesi gibi fiziko-kimyasal özellikleri ile yakından ilişkilidir ve bu özellikler hazırlık koşullarına göre değişir (M. Ahmad vd., 2014; J. Wang & Wang, 2019a). Nanopartiküller, yeşil kimya kullanılarak çeşitli bitkilerden üretilir ve ilaç sanayinde kullanılır. Elma (Wang vd., 2022), Helleborus niger çiçeği (Xue vd., 2022), Mentha longifolia çiçeği (L. Wang vd., 2022), ayva (Li vd., 2022), agorase (Cai vd., 2022) ve nişasta (Chen vd., 2022) türevleri gibi bitkilerden elde edilen nanopartiküller örnek olarak verilebilir. Bunun dışında, bitkilerden elde edilen çeşitli adsorplayıcılar da üretilmekte ve çevre kirliliğini önlemek için etkili ve ucuz bir yöntem olarak adsorpsiyon çalışmalarında kullanılmaktadır. Biyoçar hazırlamak için çeşitli biyokütle ve atık malzemeler kullanılmıştır. Adsorpsiyon uygulamaları için, çeşitli hurma ağacı atıklarından hazırlanan biyoçar daha fazla dikkat çekmektedir (Burezq

& Davidson, 2023; Zubair vd., 2020b). Hurma ağacı veya *Phoenix dactylifera* L., kurak ve yarı kurak bölgelerde yaygın olarak yetişen ve tıbbi özellikleriyle de tanınan bir ağaçtır (T. Ahmad vd., 2012; Burezq & Davidson, 2023). Hurma ağaçları, kuru yapraklar, dallar, gövdeler, tohumlar vb. şeklinde büyük miktarlarda atık üretir. Tek bir hurma ağacı, yıllık olarak yaklaşık 20 kg kuru dal üretebilir. Üretilen atıklar genellikle açık havada yakılır veya çöp sahalarına atılır. Büyük miktarlarda atık üretimi nedeniyle hurma ağacı atıklarının kullanımı son yıllarda dikkat çekmiştir. Hurma ağacı atıklarından değerli ürünler üretmek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bu kalıntıların biyoçar üretimi için hammadde olarak kullanılması, sürdürülebilir hedeflere ulaşmak için uygun bir stratejidir (Burezq & Davidson, 2023). Biyokütle pirolizi yoluyla doğrudan elde edilen biyoçar malzemelerinin genellikle zayıf yüzey işlevselliği, sınırlı aktif grupları ve düşük gözenekliliği ve yüzey alanı olduğu için, bu dezavantajlar fonksiyonel malzemeler olarak geniş uygulamalarını sınırlar (Leng vd., 2021). Biyoçar'ın yüzey özellikleri, kirleticileri adsorplama yeteneğini artırmak için fiziksel ve kimyasal aktivasyonla ayarlanabilir (Nguyen vd., 2023b; J. Wang & Wang, 2019b). Tipik olarak, kimyasal aktivasyon, karbon verimi, gözenek yapısı ve özgül yüzey alanı açısından fiziksel aktivasyona tercih edilir (Liu vd., 2010a). Kimyasal aktivasyon, termal işlem den önce biyokütle veya biyoçar'ın aktif hale getirme ajanları ile ön işleme tabi tutulmasıyla gerçekleştirilebilir. Asit modifikasyonu, biyoçar'ın yüzeyine asidik fonksiyonel gruplar ekleyerek ve kirleticileri uzaklaştırarak yüzeyini değiştirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Besin tipi, asit miktarı ve türü ve hazırlık koşulları, biyoçar'ın özellikleri üzerinde önemli etkiye sahip parametrelerdir (M. Li vd., 2023; J. Wang & Wang, 2019b). Bu amaçla sitrik asit, sülfürik asit, fosforik asit, nitrik asit ve hidroklorik asit gibi çeşitli asitler kullanılmıştır. Fosforik asit, genellikle kullanılan diğer kimyasal aktivasyon ajanlarına göre ucuz, geri dönüştürülebilir, çevre dostu ve aktivasyon ekipmanının korozyonu üzerinde etkisi olmayan avantajlar sağlar (Jabar vd., 2022). Mikrodalga ile indüklenen aktivasyon süreci, operasyonel parametreleri değiştirerek gözenek şeklini ayarlamaya olanak tanıyan hızlı, enerji tasarruflu ve etkili bir yöntemdir. Biyoçar, iyi bilinen etkili bir mikrodalga absorplayicisidir ve mikrodalga destekli yaklaşım kullanılarak biyoçar'ın rejenerasyonu ve modifikasyonu daha yüksek verimlerle başarıyla gerçekleştirilebilir (Ania vd., 2005; Liu vd., 2010b; Menendez vd., 1999; Selvam S & Paramasivan,

2022). Ayrıca, mikrodalga kullanımının, diğer termal yöntemlere kıyasla biyoçar'ın aktivasyonu için daha az zaman gerektirdiği bildirilmiştir (Namazi vd., 2016; Villota vd., 2018). Çeşitli biyosorbanlarla malahit yeşilinin uzaklaştırılmasına yönelik çalışmaların karşılaştırması Tablo 1.1'de verilmiştir (Akar vd., 2013; Altintig vd., 2018; Choudhary vd., 2020; Ganguly vd., 2020; Ghasemi vd., 2016; Hameed & El-Khaiary, 2008; Hemmati vd., 2016; Singh vd., 2016; Yao vd., 2020a, 2020b; Zaidi vd., 2019). Çevre dostu adsorplayıcıların bitkilerden üretilmesinin boya adsorpsiyon çalışmalarında son dönemde etkili sonuçlar verdiği dikkat çekmektedir. Su içeren boyalardan boyaların uzaklaştırılması için hurmanın bir adsorplayıcı olduğu bilinse de, malahit yeşilinin uzaklaştırılması ve adsorplayıcı olarak uygulanan fosfatlama sonucunda elde edilen hurma ağacı dallarının biyoçar kullanımı ile ilgili çalışmaların eksikliği, bu çalışmanın planlanmasını sağlamıştır. Çalışmanın amacı, malahit yeşilinin izotermal koşullar altında sulu çözeltilerden uzaklaştırılması için hurma ağacı dallarından mikrodalga radyasyonu kullanılarak H_3PO_4 ile aktif hale getirilmiş biyoçar üretmektir. Çalışmamızda, ham hurma dalı talaşı, hurma dalı talaşından elde edilen biyoçar ve fosforik asit ile yüzeyi modifiye edilmiş biyoçar kullanılmıştır. Tüm adsorplayıcılar için adsorpsiyonun dengeye ulaşma süresi 45 dakikadır ve diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, adsorpsiyon sürecinin en kısa sürede dengeye ulaştığı görülmüştür. Ayrıca, hurma dalı talaşından elde edilen biyoçar kullanılarak yapılan adsorpsiyon çalışmasında, maksimum adsorpsiyon kapasitesinin hurmanın ham formuna göre yaklaşık 2,7 kat arttığı gözlemlenmiştir. Çalışmamızda, malahit yeşili boya çözeltilisinin doğal pH'ı kullanılmış ve doğal pH'da elde edilen sonuçlar yüksek olduğundan, çalışmamızın avantajlarından biri, diğer çalışmalara kıyasla pH ayarlamasına gerek duyulmamasıdır.

Tablo 1.1. Çeşitli biyosorbanlarla malahit yeşilinin uzaklaştırılması üzerine çalışmaların karşılaştırılması.

Adsorplayıcı	Adsorbat	Adsorpsiyon kapasite esi (mg/g)	Konsantrasyon aralığı (mg/L)	Temas süresi (dakika)	Sıcaklık (°C)	pH	References
Pirinç samanı-çar	Malahit yeşili	148.74	25– 300	120	30	5	(Hameed & El-Khaiary, 2008)
Aktif karbon üretmek için harcanmış çay yaprakları	Malahit yeşili	256.4	220	180	45 ± 1	4	(Akar vd., 2013)
(STAC)							
AC elde etmek için kestane kabukları (CS)	Malahit yeşili	103–106	25–200	60	25–45	7	(Altıntig vd., 2018)
Biyo-bazlı (CS) manyetik aktif karbon		217–311	25–200	60	25–45	7	
Tetraetilenepentamin ile fonksiyonlandırılmış Rosa canina-L meyveler aktif karbon	Malahit yeşili	333	25–65	120	25	8	(Ghasemi vd., 2016)
(TEPFRCA)	Malahit yeşili	163.3	20	120	50	9	(Singh vd., 2016)
Okaliptüs (Eucalyptus globulus) ağacı	Malahit yeşili	42	5–20	120	–	6.2	(Ganguly vd., 2020)
Pirolize pirinç kabuğu Biyoçarı	Malahit yeşili	254	0–2500	190	25	Nötr	(Zaidi vd., 2019)
Artocarpus odoratissimus yaprakları (TL)		425	0–2500	190	25	Nötr	
Tabanı değiştirilmiş Artocarpus odoratissimus yapraklar (TTL)	Malahit yeşili	1341.4	10–1000	210	–	6	(Choudhary vd., 2020)
Opuntia'dan elde edilen aktif Biyoçar							
ficus-indica	Malahit yeşili	430.4	700–1000	150	20–50	7	(Yao vd., 2020b)
Aktifleştirilmiş wakame Biyoçarı malzemesi ((Undariapinnatifida))	Malahit yeşili	122	10–150	90	20–45	6.5	(Hemmati vd., 2016)
Hurma kömürü	Malahit yeşili	334	25–250	45	25	Boyanın doğal pH'ı (3.2)	In this study
Hurma		125	25–250	45	25	Boyanın doğal pH'ı (3.2)	In this study
Fosfath kömür		32	25–250	45	25	Boyanın doğal pH'ı (3.2)	In this study

BÖLÜM 2

BİYOÇAR'IN ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİ

2.1. BİYOKÜTLE

Yenilenebilir enerji kaynakları olan biyokütle çevre dostu ve yenilenebilir olma özellikleri nedeniyle geleneksel fosil yakıtlara alternatif oluşturmaktadır (Testa vd., 2014). İnsanlar geçmişte geleneksel odun yakma alışkanlığından kaynaklı olarak biyokütle kullanmıştır. Ancak, fosil yakıtların keşfi ve kullanımıyla bu enerji kaynağı parlaklığını kaybetmiştir, çünkü fosil yakıtlar daha yüksek enerji kalitesine sahiptir (Silva vd., 2018). "Biyokütle" terimi geniş bir malzeme yelpazesini kapsar. Biyokütle yakıtlar arasında ormancılık ve tarımsal artıklar, belediye yeşil atıklar, kanalizasyon çamuru, organik atık yan ürünleri ve enerji bitkileri bulunur. Biyokütle, enerji için özellikle enerji bitkisi olarak yetiştirilebilir veya diğer faaliyetlerden bir yan ürün veya atık olarak çıkabilir (Zeller-Powell, 2011).

Biyokütle, hemiselüloz, selüloz, lignin ve diğer organik maddelerden oluşur ve farklı oranlarda ve yollarla degrade olur (Bridgwater vd., 1999). Geleneksel enerji kaynakları giderek daha az erişilebilir hale geldikçe, enerji güvenliği endişelerine potansiyel olarak uygun bir çözüm olarak biyokütle kullanımı gelişmektedir. Biyokütle enerjisi üretimi için teşvik çabaları genellikle odun, odun artıkları ve fabrika atıklarına odaklanmıştır. Biyokütle kaynakları - diğer gıda ürünleri, gıda olmayan ürünler, tarım kalıntıları, hayvan gübresi vd., - sıvı yakıt veya enerji üretimi için yenilenebilir enerji kaynakları olarak çok az dikkat görmüştür (Bracmort, 2013; Niju vd., 2019). Biyokütle geniş ölçüde mevcut olduğundan, geleneksel enerji kaynaklarında bir kıtlık durumunda stratejik bir kaynaktır. Bu enerji ayrıca toplam enerji maliyetini ve fosil yakıtlı enerjiye olan gereksinimi azaltmaya yardımcı olabilir. Başka bir olumlu katkı, bu malzemenin üretimi, işlenmesi ve kullanımından

kaynaklanan sera gazı emisyonlarında bir azalmadır ve potansiyel olarak sıfır karbondioksit dengesine sahip olabilir (Bonechi vd., 2017).

2.2. PİROLİZ

Piroliz, biyokütleyi oksijen yokluğunda sıvı biyo-yağ, katı biyoçar ve pirolitik gaz gibi enerji ve kimyasal bileşiklere dönüştüren termokimyasal bir teknolojidir. Isıtma hızına ve kalış süresine bağlı olarak, biyokütle pirolizi üç türe ayrılabilir: yavaş, hızlı ve flaş piroliz (Demirbaş & Arin, 2002; Kan vd., 2016). Biyokütle pirolizi, yakıtlar ve petrokimyasal alternatifler için umut vaat eden bir yenilenebilir ve sürdürülebilir kaynak olabilir. Fosil yakıt stoklarının giderek azalmasını telafi etmeye yardımcı olabilir (Fahmy vd., 2020). Piroliz süreci, temel olarak katı yakıtın termal parçalanmasıyla tanımlanır ve bu, karbon-karbon bağlarının kopması ve karbon-oksijen bağlarının oluşmasını içerir (Uddin vd., 2018). Biyokütle pirolizi, yüzde fazla ara ürünün oluşması nedeniyle son derece karmaşıktır (Babu, 2008). Piroliz aktiviteleri, 300 ila 600 °C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Biyoçar, geleneksel yavaş piroliz sürecinin ana sonucudur; burada, biyokütle 300 ila 400°C arasında yavaşça karbonlaştırılır. Öte yandan, hızlı piroliz yöntemleri, partiküllerin yaklaşık 500°C'ye kadar hızlı bir şekilde ısınması ve oluşan buharların sıvıları yoğunlaştırmak için hızlı bir şekilde soğutulması ile meydana gelir (Nachenius vd., 2013; Venderbosch & Prins, 2010). Biyokütle pirolizinden sıvı ürünlerin verimini maksimize etmek amacıyla, düşük bir sıcaklık, yüksek bir ısıtma hızı ve kısa bir gaz kalış süresi prosedürü gereklidir (Demirbaş & Arin, 2002). Biyokütle piroliziyle kısa süreli sıcak buhar kalış periyotları (<1 s) hızlı piroliz sıvısı verimlerine kadar (75wt%) sıvı verimlerine yol açar. Genellikle biyo-yağ olarak bilinen piroliz sıvısı, taşımacılık yakıtlarına ve katma değerli kimyasallara dönüştürülebilir. Biyoçar ve gaz ürünleri, piroliz reaksiyonunu hızlandırarak veya ısı ve güç üretme görevi görebilir. Biyoçarın tarım ve çevre uygulamaları üzerinde birçok olası araştırma yapılmaktadır ve bu, piroliz değeri zincirini iyileştirmek için incelenmektedir (S. Wang vd., 2017). Oluşan biyoçar, artan enerji yoğunluğu, hidrofobisite, öğütülebilirlik ve daha düşük biyolojik bozunabilirlik gibi birçok açıdan orijinal biyokütle ile farklılık gösterir. Bu özellikler, onların, mevcut kömür tabanlı işlemlerde daha kolay işlenmesini, taşınmasını ve kullanılmasını sağlar. Biyoçar,

biyoçar olarak toprak düzenleyici olarak kullanılabilmesi gibi aktif karbon üretmek için de daha ileri işlemlere tabi tutulabilir (Nachenius vd., 2013).

2.3. MİKRODALGA PİROLİZ

Mikrodalga ısıtma, elektromanyetik enerjiyi belirli frekanslarda termal enerjiye dönüştüren temassız bir enerji transfer teknolojisidir, bu da elektromanyetik enerjinin mikrodalga ışınlamaya maruz kalan malzemeler tarafından etkili bir şekilde absorbe edilmesini, hızlı ısıtma oranlarını ima eder (Zhang vd., 2017). Mikrodalga ısıtma, ürün üretimini ve kalitesini arttırırken, kullanım kolaylığı için hızlı açma/kapama kontrolü sunar. Ayrıca, işlem egzoz kirleticilerini azaltır ve tehlikeli ürünlerin gelişimini azaltarak çevresel olarak uygun bir süreçtir (Li vd., 2016). Mikrodalga ısıtma, dipol dönmesi ve iyonik iletim olmak üzere iki mekanizma kullanır. Her ikisi de malzemeleri hızlı ve homojen bir şekilde ısıtabilir (Huang vd., 2016). Mikrodalga ısıtma, radyasyonun yalnızca yüzey malzemesiyle etkileşimde bulunmadığı, aynı zamanda yüzeye penetre ettiği ve malzemenin çekirdeğine temas ettiği bir işlemdir. Isıtma hızı, kalma süresi, katalizör varlığı, sıcaklık ve benzeri geleneksel piroliz işlemlerinin koşulları, ilgilenilen ürünlere dayanarak parametrelerin ayarlanabilmesi için mikrodalga ısıtmaya uygulanabilir. Piroliz için mikrodalga ısıtma, geleneksel yöntemlere kıyasla çeşitli avantajlar sunar, bunlar arasında zaman tasarrufu, artan verimlilik, ısıtma sürecine daha fazla kontrol, azaltılmış ekipman boyutu vb. bulunur (Luo, vd., 2021; Mokhtar vd., 2012).

Mikrodalga yaklaşımı, kimyasal süreçleri hızlandırmak ve iyileştirmek için en umut verici teknolojilerden biridir. Reaksiyonlar, etkili ısı transfer profilleri nedeniyle diğer geleneksel yöntemlerden daha etkili bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu, piroliz sürecindeki en büyük teknolojilerden biri olarak gelişmektedir; kalma süresini en aza indirir ve kimyasal süreçleri hızlandırır, bunun sonucunda enerji tasarrufu sağlar (Motasemi & Afzal, 2013). Son yıllarda mikrodalga piroliz, enerji verimli ısıtmanın ve geleneksel piroliz prosedürlerinin sunabileceğinden daha yüksek kaliteli yakıt ve kimyasal bileşiklerin üretilme olasılığına ilham verdiğinden araştırmacıların ilgisini çekmiştir (Robinson vd., 2022). Mikrodalga piroliz, tehlikeli atıklarda bulunan bileşiklerin geri kazanılması ve yeniden kullanılmasında etkili bir yöntem olduğu

kanıtlanmış bir teknolojidir. Bu süreçte, atık malzeme, mikrodalga enerjisini absorbe eden ve yaygın pirolizin gerçekleşmesi için gereken sıcaklıkları üretebilecek kadar termal enerjiyi üreten bir madde olan partikül karbon gibi yüksek mikrodalga emici bir madde ile birleştirilir. Mikrodalga ısıtma, oksijenin olmadığı ortamda atık malzemenin daha küçük moleküllere termal olarak ayrılmasına neden olur (Lam & Chase, 2012). Uygun bir mikrodalga reaktöründe, elektromanyetik radyasyon, malzemenin elektrik enerjisini ısı olarak dağıtma yeteneğini ifade eden dielektrik kayıp faktörüyle orantılı olarak biyokütle tarafından absorbe edilir ve dielektrik kayıp ısıtması sonucunda malzemenin ısıtılmasına neden olur. Belirli bir güç seviyesi üzerinde düşük basınçlı bir gaz varlığında, radyasyon gaz iyonizasyonunu tetikleyebilir ve plazmanın oluşumuna neden olabilir (Krieger-Brockett, 1994). Lignoselülozik biyokütlelerin mikrodalga pirolizi, değerli ürünlerin üretilmesi için potansiyel bir teknolojidir. Mikrodalga ve geleneksel ısıtmanın farkı, farklı ısıtma yöntemlerine (dielektrik karşılığı konveksiyonel ve iletken ısıtma) ve mikrodalga ısıtmasının neden olduğu bir sıcak noktanın (kıvılcım) varlığına atfedilebilir (Huang vd., 2016).

2.4. BİYOÇAR

Biyočar, yirmi birinci yüzyılda benzersiz özellikleri, geniş uygulanabilirliği ve güçlü gelişme potansiyeli nedeniyle disiplinlerarası araştırmaların odağı haline gelmiştir. Gıda güvenliği, çevresel kirlilik ve enerji kıtlığına yanıt olarak tarımda, çevrede ve enerjide , biyoçarın kullanımıyla ilgili temel ve uygulamalı araştırmalar önemli ölçüde genişlemiştir (Chen vd., 2019). Biyoçar ve çeşitli uygulamaları son yıllarda dünya çapındaki araştırmacılar tarafından yoğun bir şekilde incelenmiştir. Biyoçar, biyokütlenin ve biyolojik olarak parçalanabilir atıkların piroliz edilmesiyle elde edilen, yüksek organik karbon içeriğine sahip ve düşük bozunma duyarlılığına sahip ince taneli bir karbonlaştırma ürünüdür (Saletnik vd., 2019). Genellikle kömür olarak bilinen biyoçar, biyokütle bileşenlerinin kısmi veya tam bozunması sonucu oluşan dönüşmüş organik katılar ve karbon artıklarından, ayrıca mineral fraksiyondan oluşur. Kömürlerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri, kullanılan hammaddenin ve piroliz işlemi koşullarının bir sonucudur (Kan vd., 2016). Biyokütle termokimyasal ayrışması sırasında oluşan biyoçar, atmosfere karbon emisyonlarını

en aza indirmekle kalmaz, aynı zamanda aktif karbon ve diğer karbon bileşiklerine çevresel olarak kabul edilebilir bir alternatif olarak da hizmet eder (Cha vd., 2016). Biyoçar, biyokütlenin karbonlaştırılması, piroliz veya gazlaştırılması yoluyla katı formda ve biyokütlenin basınç altında hidrotermal karbonlaştırılması yoluyla çamur formunda elde edilir (Qian vd., 2015). Ayrıca, biyoçar, biyokütlenin 300 ila 1000 °C arasındaki sıcaklıklarda ısıtılmasıyla oluşur (Xie vd., 2015). Hem lignoselülozik hem de lignoselülozik olmayan biyokütlelerin termokimyasal dönüşümü karbonlu malzemeler üretir ki bunlar oldukça umut verici malzemelerdir. Bu biyokökenli karbon, genellikle biyoçar olarak bilinir ve çeşitli uygulamalar için kullanılabilir (Bartoli vd., 2020). Biyoçar üretimi hem sürdürülebilir hem de maliyet bakımından etkin olduğu için şu anda birçok çığır açan biyoçar uygulamalarıyla ilgili çalışma yapılmaktadır (Sakhiya vd., 2020). Biyoçarın en cazip yönü, ekonomik, sürdürülebilir ve basit bir teknik olmasıdır ki bu, petrokimyasallardan veya diğer kimyasal işlemlerden elde edilen bileşiklere kıyasla daha geniş uygulamalı ürünlerin sentezine olanak tanır. Çoğu uygulama henüz erken aşamada olsa da, biyoçar zaten olağanüstü sonuçlar elde etmek için çeşitli şekillerde kullanılabilir. Bu kullanımlar arasında toprak düzenlemesi, su arıtma, kataliz ve enerji ve gaz depolama bulunur (Qian vd., 2015).

2.4.1. Biyoçarın Özellikleri

Biyoçar özellikleri, kullanılan biyokütle hammaddesi türüne ve piroliz işlem parametrelerine bağlıdır. Biyokütle hammaddesi, biyoçar özelliklerini belirlemede en önemli belirleyicidir. Biyoçar, kimyasal, fiziksel ve yapısal bileşim açısından büyük farklılıklar gösteren çeşitli tipte ve boyutta biyokütlelerden yapılabilir. Hemen hemen her tür biyokütle ile biyoçar üretilebileceği öne sürülmektedir (Aller, 2016). Biyoçar, biyokütle pirolizi yoluyla üretilir ve geniş uygulama alanına sahip olan çeşitli fiziksel, kimyasal ve diğer özelliklere sahiptir (Mukome vd., 2013). Biyoçarın kimyasal özellikleri, bu karbonun karbon stabilitesini ve karbon tutma etkinliğini anlamak için hayati öneme sahiptir ve bu özellikler; kısmi analiz, nihai analiz, ısı değeri, atomik oranlar, işlevsellik, pH değeri, katyon değişim kapasitesi (KDK), kül içeriği ve bileşimi ve reaktiviteyi içerir. Kimyasal karakterizasyon, kısmi ve nihai analiz dahil olmak üzere çeşitli metodlar kullanılarak gerçekleştirilir. Kısmi analiz,

biyoçarında nem, uçucu madde, sabit karbon ve kül içeriğinin ağırlık oranını belirler ve yanma sırasındaki davranışı hakkında bilgi sağlar. Nihai analiz ise karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) ve nadiren kükürt (S) gibi temel elementlerin oranını değerlendirir ve elemental kompozisyon üzerine odaklanır. Isı değeri, biyoçarın enerji içeriğini yansıtır; piroliz sırasında daha yüksek sıcaklıklar karbon içeriğini artırır ve dolayısıyla enerji içeriğini artırır. O: C ve H: C mol oranları gibi atomik oranlar, karbon stabilitesini ve olgunluğunu belirlemek için kullanılır ve Van Krevelen diyagramlarında gösterilir. İşlevsellik, termal parçalanma sonrası hidrojen ve oksijen içeriğindeki azalma olarak tanımlanır, bu da biyoçarda daha az fonksiyonel grup ve daha fazla aromatik yapıya neden olur. Biyoçarın pH değeri, piroliz sırasında asidik fonksiyonel grupların salınması nedeniyle karbonlaşma sıcaklığıyla artar. Katyon değişim kapasitesi (KDK), değişebilir katyonları tutma yeteneğinin bir ölçüsüdür ve daha düşük sıcaklıklar daha yüksek KDK ile sonuçlanır. Kül konsantrasyonu ve bileşimi piroliz sıcaklığı arttıkça artar ve kompozisyon, ana biyokütleye göre değişir. Reaktivite, termokimyasal işlemler sırasında biyoçar dönüşümünü etkiler ve yüzey şekli, reaksiyonlar için aktif sitelerin kullanılabilirliğini belirler. Bu nitelikleri anlamak, biyoçar üretimini optimize etmek ve olası uygulamalarını değerlendirmek için kritiktir (Aller, 2016; Chen vd., 2019; Weber & Quicker, 2018). Biyoçarın fiziksel özellikleri, belirli yüzey alanı, parçacık boyutu dağılımı ve gözeneklilik gibi, etkinliğini anlamak için kritiktir. Biyoçarın adsorpsiyon kapasitesini belirleyen yüzey alanı, 1.5 ila 500 metrekare arasında değişir. Piroliz sıcaklığı yükseldikçe, yüzey alanı, ek mikroporöz yapıların oluşturulması nedeniyle genişler. Parçacık boyutu dağılımı, biyokütle kaynağına, piroliz prosedürlerine ve sıcaklığına göre değişir. Odun esaslı biyoküteller daha iri porozlu biyoçar oluştururken hızlı piroliz daha küçük porozlu parçacıklar verir. Biyoçar gözenekleri, mikro gözenekler, mezoporlar ve makroporlar gibi, adsorpsiyon kapasitesine katkıda bulunur ve bu da toprak iyileştirmesi ve çevresel iyileştirme üzerinde etkili olur (Chen vd., 2019; Tomczyk vd., 2020; Weber & Quicker, 2018).

2.4.2. Biyoçarın Aktivasyonu

Biyoçarın çeşitli kullanımlar için tam potansiyelini gerçekleştirmede biyoçarın aktivasyonu önemli bir adımdır. Biyoçar, belirli ihtiyaçları karşılamak için yüzey

alanını, gözenek yapısını ve kimyasal bileşimini değiştirmek için fiziksel, kimyasal veya biyolojik tekniklerle aktive edilebilir (Akhil vd., 2021). Aktive edilmiş karbon malzemeler genellikle biyoçar temelli öncüllerinden veya termal olarak stabil biyokütleden türetilmiş karbondan üretilmektedir. Bu değişiklik, biyoçarın adsorpsiyon kapasitesini, katalitik aktivitesini ve toprak iyileştirme özelliklerini artırır (Patra vd., 2021b). Fiziksel aktivasyon, oksijenin olmadığı bir ortamda ısı işlemini içerir, bu da sonuç olarak oldukça gözenekli bir yapı oluşturur. Isı için kullanılan kaynak da ayrıca önemlidir (yani mikrodalga veya geleneksel ısı). Kimyasal aktivasyon, gözenek oluşumunu ve fonksiyonel hale getirme işlemini teşvik etmek için kuvvetli asit ve bazları kullanır (Lee vd., 2018). Biyoçarın aktivasyon mekanizmalarını ve etkilerini anlamak, sonunda çevresel iyileştirme, tarım ve enerji üretiminde etkinliğini artırmak için kritiktir ve nihayetinde sürdürülebilir kalkınma çabalarına katkı sağlar (Panwar & Pawar, 2020).

2.4.3. Biyoçarın Sulu Çözeltilerden Kirleticilerin Giderilmesinde Kullanımı

Biyoçar, boyalar, ağır metaller, organik kirleticiler, azot ve fosfor kirlilikleri ve diğer kirleticileri sulu çözeltilerden uzaklaştırmak için kullanılmaktadır. Biyoçarın adsorpsiyon özellikleri, üretiminde kullanılan hammaddeyle oldukça ilişkilidir (Cha vd., 2016; Sakhiya vd., 2020). Hammaddenin seçimi ve piroliz koşulları, biyoçarın benzersiz fizikokimyasal özelliklerinin geliştirilmesine olanak tanır. Dolayısıyla, kirleticilerin adsorpsiyonu için çeşitli özelliklere sahip, biyoçarın kullanılması, istenen adsorpsiyon ve filtreleme kapasitelerine ulaşılmasına yol açabilir.

Biyoçar kullanılarak boyaların adsorpsiyonu, atık su arıtımı ve çevresel iyileştirme alanındaki potansiyel uygulamaları nedeniyle önemli bir araştırma konusudur (Srivatsav vd., 2020). Biyoçarın gözenekli yapısı ve geniş yüzey alanı, sulu çözeltilerden boyaların uzaklaştırılması için onu iyi bir adsorbent yapar (Praveen vd., 2022). Elektrostatik etkileşimler, hidrojen bağları ve π - π etkileşimleri, adsorpsiyon sürecinde boyar moleküllerinin biyoçar yüzeyine bağlanmasını sağlar (Su vd., 2024). Biyoçar parametreleri yüzey alanı, gözenek boyut dağılımı, yüzey fonksiyonel grupları, boya özellikleri molekül boyutu, yükü, yapısı, çözelti koşulları pH, sıcaklık, iyonik kuvvet ve temas süresi, adsorpsiyon verimliliğini etkiler (Praveen vd., 2022;

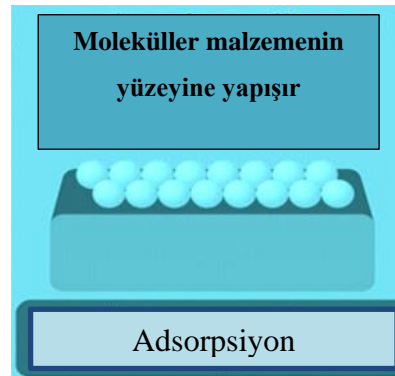
Qiu vd., 2022). Boyaların biyoçar üzerine adsorpsiyonunu etkileyen mekanizmaları anlamak ve işlem parametrelerini iyileştirmek, etkili ve uzun ömürlü boya giderme zmleri tasarlamak için önemlidir (Goswami vd., 2022).

Ağır metal adsorpsiyonu, iyon değişimi, fiziksel adsorpsiyon, elektrostatik çekim, yüzey kompleksleşme ve çöktürme gibi çeşitli etkileşimleri içerir, bu da biyoyararlanılabilirliği ve fitotoksitesi azaltır. Biyoçar, büyük yüzey alanına, gözenekliliğe ve ağır metal iyonları ve aromatik bileşiklerin yüzeyindeki adsorpsiyon kapasitesi için yüksek bir işlevsel grupların afinitesine sahiptir. Böylece atık sulardaki ve topraklardaki kirleticileri uzaklaştırır. Biyoyarların kirletici adsorpsiyon kapasitesi, ayrıca belirli yüzey alanlarına ve aromatikliğe bağlıdır (Jiwan & Ajay, 2011; Piscitelli vd., 2018).

BÖLÜM 3

ADSORPSİYONUN MEKANİZMASI

Adsorpsiyon; gaz ya da sıvı karışımlarından maddeleri uzaklaştırmak için özel katıların kullanıldığı bir prosestir. Katı veya sıvı partiküllerin bir katı yüzeyine bağlandığı bu proses endüstride önemli bir prosestir. Adsorpsiyon süreçleri, belirli kimyasalları (gaz veya sıvı) çözeltilerden seçici olarak yüzeylerine konsantre edebilme yeteneğine sahip adsorplayıcılardan faydalanır (Dąbrowski, 2001). Gaz veya sıvı partiküllerin bağlandığı özel katılara “adsorplanan” denir. Adsorplanan maddeye ise “adsorplayıcı” adı verilir (Ali & Gupta, 2007). Belirli bir senaryoda adsorpsiyonun boyutu, adsorplayıcı ve temas eden çözelti arasında denge kurulduğunda elde edilir (Tien, 2018). Adsorpsiyon yüzeyde gerçekleşen bir olaydır; moleküller yüzey tarafından yakalanır. Adsorpsiyon mekanizması Şekil 3.1 de basitçe ifade edilmiştir



Şekil 3.1. Adsorpsiyon mekanizması

(<https://www.shutterstock.com/tr/search/adsorption>)

Adsorpsiyonun, çevre korumasında pratik uygulamaları kritiktir. Adsorpsiyon, zararlı ve dirençli kirleticilerin sulu sistemlerden uzaklaştırılması için basitliği,

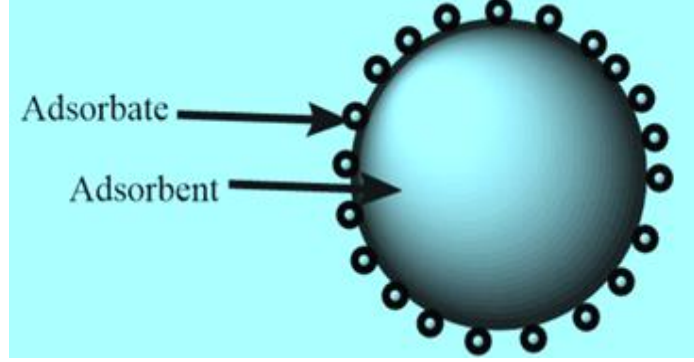
kullanım kolaylığı, düşük maliyeti ve yüksek esnekliği nedeniyle en popüler stratejilerden biridir. Kömür, silika jel, zeolit ve gözenekli killer adsorplayıcı olarak kullanılır. Aktif karbon en yaygın kullanılan adsorplayıcılardan biridir (Srivastava vd., 2021; Ugege & Leonard, 2016; Lai vd., 2019 Mhemeed, 2018). Su kirliliği, günümüzde küresel en yaygın sorunlardan biri olarak kabul edilmektedir. Endüstriyel faaliyetler sıklıkla malahit yeşili (MG) gibi boyaları da içeren kirleticileri su kütlelerine deşarj eder. Bu kirleticiler, sucul yaşam ve insan sağlığı için ciddi tehditler oluşturur. Geleneksel su arıtma yöntemleri belirli kirleticilerin uzaklaştırılmasında maliyetli ve etkisiz olabilir. Bu nedenle, maliyet-etkin ve sürdürülebilir alternatif arıtma teknolojilerinin geliştirilmesine artan bir ilgi vardır.

Bir umut verici yaklaşım, tarımsal atıklardan elde edilen biyobazlı adsorplayıcıların kullanımını içerir. Bu materyaller, sadece atık bertarafı için sürdürülebilir bir çözüm sunmakla kalmaz, aynı zamanda geleneksel adsorplayıcılara göre potansiyel maliyet avantajları da sunar. Bu çalışma, özellikle suyun MG'den (malahit yeşili) arındırılması için tarımsal atıklardan elde edilen adsorplayıcıların etkinliğini incelemeyi amaçlamaktadır. Bulgular, yenilenebilir kaynakları kullanan ve endüstriyel kirlilik sorununu ele alırken su arıtımı için yeni, sürdürülebilir bir yöntemin geliştirilmesine yol açabilir. Çeşitli tarımsal atık türleri arasında, belirli bölgelerde bol miktarda bulunan ve selüloz içeriği yüksek olan hurma dalları (DPF), adsorpsiyon özelliklerini artırabilen özellikle avantajlı bir seçenek olarak ortaya çıkar. Ayrıca, DPF'nin piroliz yoluyla biyoçara dönüştürülmesi (DPC) veya mikrodalga piroliz yoluyla üretilen fosfatlı hurma biyoçarı (DPMW) artan yüzey alanı ve gözeneklilik nedeniyle adsorpsiyon kapasitesini önemli ölçüde artırabilir.

3.1. ADSORPSİYON PRENSİPLERİ VE SÜRECİ

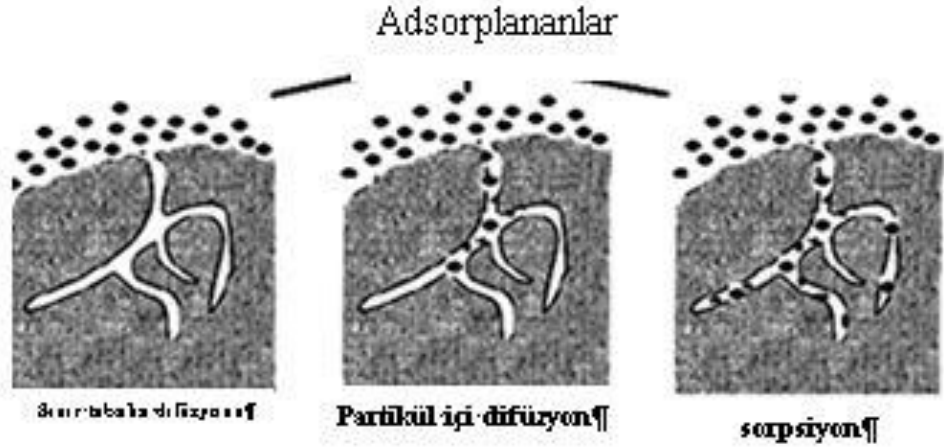
Adsorpsiyon, gaz veya sıvı maddenin moleküllerinin, atomlarının veya iyonlarının, başka bir katı cismin yüzeyinde birikmesiyle gerçekleşen bir süreçtir. Bu, yüzey aktif sitelerdeki malzeme moleküllerinin zayıf Vander Waals veya kimyasal bağlar aracılığıyla etkili sitelere fiziksel veya kimyasal bir bağlanmasını içerir (Ince & Ince, 2022; Memes, 2018). Adsorpsiyon, kısmen bir sonuç olarak meydana gelir ve aynı zamanda, benzersiz sınır enerjisi üreten faz veya yüzey sınırlarında etki eden ve değişen kuvvetleri etkiler. Bu, katı bir yüzeyle bir araya gelen iki bileşeni içeren bir

yüzey olayıdır: adsorplananlar, bir katı yüzeye yapışır ve adsorplayıcı bir katı yüzdür (Şekil 3.2). Bir adsorplayıcı kirli su ile karıştırıldığında, kirleticiler yüzeyine yapışır ve denge kurar (Ugege & Leonard, 2016; WEBER JR, 2013).



Şekil 3.2. Yüzey Fenomeni (<https://scienceinfo.com/adsorption-its-types-and-applications/>).

Çeşitli adsorpsiyon sistemleri bulunmaktadır, bunlar arasında sıvı-gaz ve sıvı-sıvı sistemleri bulunmaktadır. Eğer bir sıvı malzeme bir adsorplayıcı olarak işlev görürse, bir film olarak adlandırılan bir arayüzey tabakası oluşturur. Diğer sistem ise katı-sıvı veya katı-gazdır; adsorplayıcı katı olduğunda, arayüzey tabakası modeli adsorpsiyon süreci için yetkilendirilmiş mekanizmadır. Arayüzey tabakası, adsorplayıcı ve hacim fazı arasında var olan dengeyi tanımlar. İlk bölge, alt tabakın adsorplayıcı yüzeyine bağlanmasıdır ve ikincisi, adsorplayıcının yüzey tabakasıdır (Alaçarbeh vd., 2021). Katı bir adsorplayıcıya adsorpsiyon, üç temel adımdan oluşur: kirleticinin sulu çözeltiden adsorplayıcı yüzeyine taşınması, katı yüzeye adsorpsiyon ve adsorplayıcı taneciği içindeki geçiş (Raji vd., 2023). Adsorpsiyon sürecini analiz ederken iki konuya dikkate alınabilir: Termodinamik, nihai denge arayüzey enerjisine odaklanırken, kinetik, adsorpsiyon sürecinin gerçekleşme hızıyla ilgilidir (Gawande vd., 2017).



Şekil 3.3. Katı bir adsorplayıcı üzerine adsorpsiyonun üç temel adımdan oluşur (Akdu, 2015)

3.2. ADSORPSİYONUN ETKİN FAKTÖRLERİ

Sıvı faz adsorpsiyonunun etkinliği ve dolayısıyla su arıtma işleminin uygun şekilde işlemesi, çeşitli özelliklere bağlıdır. Söz konusu emilim performansı, fizikokimyasal parametreler, kirletici türü ve kimyasal yapısı, ayrıca adsorplayıcı özellikleri tarafından etkilenir. Bu fizikokimyasal özellikler arasında adsorplayıcı/adsorpsiyon etkileşimi, adsorplayıcı yüzey kimyası ve gözenek yapısı, basınç ve temas süresi yer alır. Adsorplananın özellikleri de, molekül ağırlığı, yapısı, boyutu ve polaritesi gibi, dikkate alınmalıdır (Rápó & Tonk, 2021). Partikül boyutu, özgül yüzey alanı, yaş derecesi, kristalliği ve adsorplayıcıların polaritesi, tümünün emilim kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. pH, sıcaklık ve iyonik kuvvet, adsorpsiyon yeteneğini etkiler. Adsorpsiyon kapasitesini etkileyen faktörler, adsorplayıcıların ve organik kirleticilerin özellikleri ve çevresel koşullar olmak üzere üç açıdan incelenir (Fu vd., 2021).

Sorbent partiküllerin boyutu, başlangıçta hızlı iyon tutulumunu etkiler. Daha küçük sorbent partikülleri, daha hızlı adsorpsiyon sergilemiştir (Stirk & Van Staden, 2001). Ayrıca, toplam yüzey alanı, bir adsorplayıcının adsorpsiyon kabiliyeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Artan genel yüzey alanı, adsorplanan moleküllerin bağlanacağı daha fazla adsorpsiyon sitesi oluşturur. Gözenekli adsorplayıcıların

adsorpsiyon hızı üzerinde gözenek boyutu da önemli bir etkiye sahiptir. Yüzey kimyası, adsorplayıcı ve adsorplanan molekülleri veya atomları arasındaki etkileşim derecesini ve türünü kontrol eder. Bu fonksiyonel gruplar genel yüzey alanının küçük bir kısmını oluştursa da, kimyasal bileşimlerindeki küçük değişiklikler, adsorpsiyon yeteneğinde önemli değişikliklere neden olabilir (Le-Minh vd., 2018). Yüksek veya düşük pH, adsorpsiyon derecesini değiştirebilir. Adsorpsiyon hızı, mutlak sıcaklıkla üstel olarak artabilir veya azalabilir. Adsorplayıcının çözücüdeki çözünürlüğü de adsorpsiyon sürecini etkiler, çünkü çözünürlüğün artması adsorplayıcı miktarını azaltır (Mhemeed, 2018).

3.3. ADSORPSİYON TÜRLERİ

Her adsorpsiyon türü, adsorplanan ile adsorplayıcı malzeme arasındaki benzersiz mekanizmalar ve etkileşimler gerektirir. Bu çeşitli adsorpsiyon türlerini anlamak, verimli ayırma süreçleri oluşturmak, yeni malzemeler yaratmak ve katalitik reaksiyonları geliştirmek için kritik öneme sahiptir (Luo vd., 2021; W John Thomas & Crittenden, 1998).

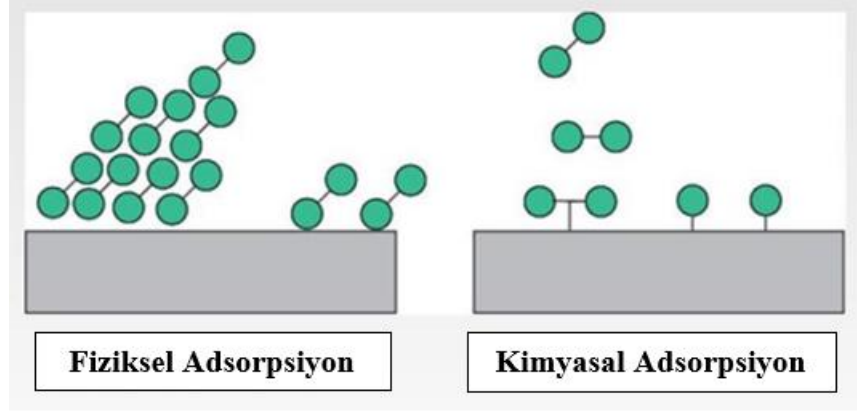
3.3.1. Fiziksel Adsorpsiyon

Fiziksel adsorpsiyon, diğer adıyla fizikisorpsiyon, adsorplanan moleküllerin Van der Waals kuvvetleri gibi zayıf etkileşimlerle adsorplayıcı yüzeyine bağlandığı bir adsorpsiyon türüdür. Bu Van der Waals kuvvetleri oldukça zayıf olup, fiziksel adsorpsiyonu daha az seçici ve çevresel basınç ve sıcaklık koşullarından daha fazla etkilenir hale getirir. Bu yöntemle kimyasal bağlar oluşmaz (Alaqrbeh vd., 2021).

3.3.2. Kimyasal Adsorpsiyon

Kimyasal adsorpsiyon, diğer adıyla kemisorpsiyon, adsorplanan ile adsorplayıcı arasındaki kimyasal bağ oluşumunu içerir. Bu, adsorplanan ve adsorplayıcı arasındaki elektron yoğunluğunun yeniden düzenlenmesiyle meydana gelir; bu bağ türü iyonik veya kovalent olabilir. Bu kimyasal bağlar, fizikisorpsiyonda görülen zayıf temaslardan daha güçlüdür ve işlem genellikle geri döndürülemez niteliktedir

(Alaqrbeh vd., 2021). Kemisorpsiyon, yüzey reaksiyonlarında kritik bir rol oynar ve bu reaksiyonlar, en az bir reaksiyon bileşeninin katalizörün yüzeyiyle güçlü kimyasal bağ oluşturduğu durumlardır. Bu yüzey reaksiyonları, kemisorbe edilen bileşenin başka bir kemisorbe edilen bileşen veya katı katalizörün yakınındaki sıvı fazda bulunan bir bileşenle etkileşime girmesiyle gerçekleşir (Králík, 2014).



Şekil 3.4. Adsorpsiyon Türleri Kaynak: (<https://mme.deu.edu.tr/wp-content/uploads/2017/07/YuZEYKiMYASIDERS.pdf>).

3.3.3. İyon Değişimi

İyonik adsorpsiyon, çözelti içinde bulunan iyonların katı bir malzemenin yüzeyine yapışması olgusudur. İyon değiştiriciler, fonksiyonlarına ve destek matrisinin fiziksel özelliklerine göre sınıflandırılır (LeVan vd., 1997). İyon değişimi, sıvı ve katı fazlar arasında iyonların değiş tokuşudur. Eğer saf bir iyon değişim süreci gerçekleşirse, salınan iyonların miktarı, süreç tarafından alınan iyonların miktarına eşit olur. Doğada saf adsorpsiyon veya iyon değişimi nadiren karşılaşılır. Adsorpsiyon ve iyon değişimi, önemli çevresel süreçlerdir ve bunların tanımlamaları su kalitesi modellemesinde sıklıkla yer alır (Jørgensen, 1989).

3.3.4. Spesifik Olmayan Adsorpsiyon

Spesifik olmayan adsorpsiyon, moleküllerin belirli veya seçici etkileşimler oluşturmadan bir yüzeye yapışması olgusudur. Spesifik olmayan adsorpsiyon, daha

zayıf kuvvetler sonucunda meydana gelir. Bu tür adsorpsiyon, yüzeylerin çevrelerindeki çeşitli moleküllere yüksek bir afinitesi olduğunda ortaya çıkar ve bu da moleküllerin ayırım gözetmeksizin yüzeye yapışmasına neden olur (Lichtenberg vd., 2019).

3.4. Adsorpsiyonun Uygulamaları

Adsorpsiyon uygulamaları genel olarak iki ana alanda kategorize edilebilir: çevresel ve endüstriyel. Çevresel alanda, adsorpsiyon su ve havayı arıtmada kritik bir rol oynayarak çevresel sağlığın korunmasına ve yenilenebilir yaşam kaynaklarının sağlanmasına katkıda bulunur. Endüstriyel alanda ise adsorpsiyon, malzemeleri arıtarak ve kalitelerini artırarak, endüstriyel üretim süreçlerinde verimliliği ve üretkenliği artırma kabiliyetini sergiler. Geniş ve çeşitli uygulama alanlarına rağmen, araştırmalar sadece birkaç yaygın uygulamaya odaklanmıştır (Dąbrowski, 2001).

3.4.1. Su ve Hava Arıtımı

Adsorpsiyon, su ve hava arıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktif karbon ve silika jel, sudan organik ve inorganik kirleticileri, havadan ise tehlikeli gazları ve aromaları gidermek için sıklıkla kullanılır. Bu malzemeler, kirleticileri adsorpsiyon yoluyla yakalayarak su ve hava kalitesini iyileştirir (Mohammad-Khah & Ansari, 2009; Rashed, 2013).

3.4.2. Kimyasal Bileşiklerin Ayrılması

Adsorpsiyon, çeşitli süreçlerde kimyasal bileşenlerin ayrılmasında esastır. Zeolitler ve diğer adsorplayıcı malzemeler, karışımlardan belirli bileşenleri seçici olarak adsorbe etmek için kullanılır ve bu sayede istenen maddelerin ayrılması ve saflaştırılması sağlanır (Li vd., 2009). Bu, özellikle ilaç ve petrokimya gibi endüstrilerde önemlidir; ayrıca, adsorpsiyon süreçleri ham petrol ve doğal gazın arıtılmasında da kullanılmaktadır (Cotoruelo vd., 2011).

3.5. Doğal ve Sentetik Adsorplayıcılar

Adsorplayıcı türleri iki ana kategoriye ayrılmaktadır: doğal ve sentetik adsorplayıcılar. Doğal adsorplayıcılar, doğrudan doğadan elde edilen malzemelerdir. Öte yandan, sentetik adsorplayıcılar daha özel ihtiyaçları karşılamak üzere tasarlanmıştır ve bu kategori iki alt gruba ayrılmaktadır: tarımsal ve endüstriyel adsorplayıcılar. Günümüzde, su kirliliği problemlerine etkili çözümler arayan araştırmacılar, maliyet etkinliği ve çevre dostu özellikleri nedeniyle doğal adsorplayıcılara yönelmektedir. Doğal adsorplayıcılar, kolayca temin edilebilen ve ön işlem gerektirmeyen düşük maliyetli maddelerdir. Bu adsorplayıcılar arasında, ağır metallerin tutulma kapasitesiyle öne çıkan kitosan dikkat çekmektedir. Kitosan, selülozdan sonra biyosorbanlar arasında en bol bulunan doğal polimer olan kitinden elde edilmektedir. Yapısının selüloza benzemesi ve ağır metaller için etkili bir tutucu olması, kitosanın araştırmalarda artan bir şekilde kullanılmasına neden olmuştur.

Öte yandan, zeolitler ve kil mineralleri de doğal adsorplayıcılar olarak kullanılmaktadır. Zeolitler, tetrahedral moleküllerin ortak oksijen atomları ile bağlandığı doğal kristal aminisilikatlardır. Bu yapı, stronsiyum (Sr) ve sezyum (Cs) gibi ağır metallerin iyon değişimi ile uzaklaştırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Kil, sulu alüminyum silikatlar formunda doğal bir mineral olup yüksek su emme kapasitesine sahiptir. Kaolinit, kilin en saf hali olup adsorplayıcı olarak kullanıldığında yüksek verimlilik göstermektedir.

Buna karşılık, yapay adsorplayıcılar genellikle fabrikalarda üretilmekte olup maliyetlidir. Üretim süreçleri zorlayıcı olabilir ve toksik bileşenler içerebilir, bu da sağlık riskleri oluşturabilir. Ancak, yapay adsorplayıcıların istenilen özelliklerde üretilmesi, belirli uygulamalar için büyük bir avantaj sağlamaktadır. Endüstriyel atıkların adsorplayıcı olarak kullanılması sadece maliyetleri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda atık yönetimine de katkıda bulunur. Örneğin, Hindistan'daki termik santrallerden elde edilen kül, ağır metal gideriminde etkili ve düşük maliyetli bir adsorplayıcı olarak kullanılmaktadır.

Aktif karbon, özellikle endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilen bir yapay adsorplayıcıdır. Ağaç, kömür, hindistancevizi kabuğu gibi çeşitli organik malzemelerden üretilen aktif karbonlar, yüksek gözeneklilik ve geniş iç yüzey alanı sayesinde su çözeltilerinden kirliliklerin etkili bir şekilde adsorpsiyonunu sağlar. Aktif karbonun bu üstün özellikleri, çevre kirliliği kontrolünde vazgeçilmez olmasını sağlamaktadır.

BÖLÜM 4

HURMA BİYOKÜTLESİ VE MALAHİT YEŞİLİ BOYASI HAKKINDA BİLGİ

4.1. HURMA BİYOKÜTLESİ

Hurma ağacı (*Phoenix dactylifera* L.), Arecaceae familyasının iki evcikli tek çenekli bir türüdür ve binlerce yıllık geçmişiyle dünyanın en eski kültür ağaçlarından biridir. Güney Asya veya Afrika'nın tropikal veya subtropikal iklimlerine özgü 200'den fazla cins ve 2.500'den fazla türden oluşur (Al-Alawi vd., 2017; Tahir vd., 2019). Orta Doğu, Kuzey Afrika ve Arap Yarımadası'nın kuru bölgelerindeki en önemli meyve mahsullerinden biri hurma ağacıdır. Geçtiğimiz üç yüzyıl boyunca. Bu ülkeler, bir milyon hektardan fazla bir alanda dünya çapında mevcut 105 milyon ağacın 62 milyonunu yetiştirmektedir (Chao & Krueger, 2007).

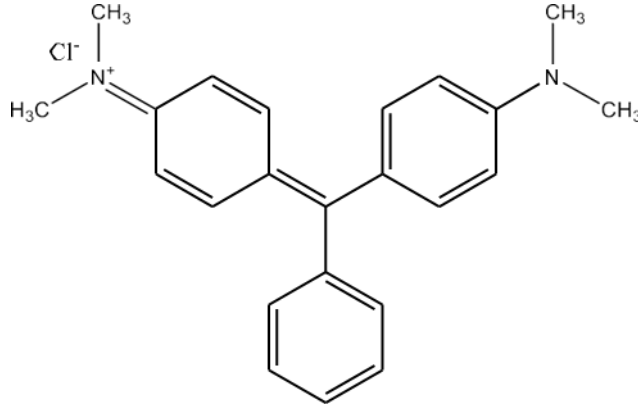
Hurma ağaçları kuru yapraklar, dallar, çekirdek vb. şeklinde muazzam miktarda tarımsal kalıntı biriktirir. Tek bir hurma ağacı, çiftlik artığı olarak yılda yaklaşık 15 kg biyokütle oluşturmakta ve 600 milyon kg yeşil biyokütle üretmektedir. Dünya genelinde hurma ağacı bölgelerinde yılda yaklaşık 50.000-ton hurma ağacı yaprağı birikmektedir. Yılda yaklaşık 20 kg kuru yaprak üretilmektedir (Tahir vd. 2019). Hurma çekirdekleri, olgunlaşmış bir hurma meyvesinin toplam kütesinin yaklaşık yüzde 15'ini oluşturur. Hurma meyvesinin toplam ağırlığının yaklaşık yüzde 11-18'ini hurma çekirdeği oluşturmaktadır (Afiq vd. 2013; Besbes vd. 2004).

Sonuç olarak, her yıl büyük miktarlarda hurma biyokütlesi üretilmektedir. Yapraklar, yaprak sapları, dallar, gövde ve çekirdek dahil olmak üzere hurma artıkları bol miktarda elde edilebilen tarımsal artıklardır, ancak hurma üreticisi ülkelerde sıklıkla atık ürün olarak atılmaktadır. Her yıl hurma hasadını takiben, tarım arazilerinde büyük miktarlarda kalıntı (yaprak ve dallar) toplanmaktadır. Hurma ağaçları, çiftliklerde atık olarak atılan veya yakılan ve hurma üreticisi ülkelerde kirliliğe

katkıda bulunan büyük miktarda kalıntı üretir. Bazı ülkeler hurmadan arta kalan biyokütleyi hayvan yemi üretmek için kullanmaktadır. Bu atıkların çevreyi etkilemeden bertaraf edilmesi zorlu bir iştir ve biyoçar ideal bir çözümdür (Burezq & Davidson, 2023). Hurma atıkları, özellikle toksisiteleri ve kurak bölgelerde çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle yüksek atık hacimleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür (Evan vd. 2020). Büyük miktarlarda üretilen hurma biyokütlesi, çoğu hurma üreticisi ülkede ekosistem için ciddi bir tehdit oluşturacak şekilde çiftliklerde biriktirilmekte veya yakılmaktadır. Kompostlamanın yanı sıra gelecek vaat eden stratejik bir yaklaşım, hurma atıklarının termal olarak zengin bir besin biyokömürüne dönüştürülmesidir (Zorpas vd. 2021). Hurma atıkları, aktif karbon ve sıvı fenolik ürünler oluşturmak için piroliz yoluyla zenginliğe dönüştürülebilir. Hurma meyvesinin ana bileşenleri selüloz, hemiselüloz ve lignin olup, diğer katı maddelerin yanı sıra yüksek uçucu içeriğe ve düşük nem oranına sahip olmaları onları mükemmel bir biyokütle kaynağı haline getirmektedir (Bassyouni vd. 2014). Hurma kalıntılarının faydalı biyokömüre dönüştürülmesi süreci, atıkların doğal ayrışması veya yakılmasıyla ortaya çıkan metan ve karbondioksit emisyonunu en aza indirir. Hurma biyokütlesinin yüksek selüloz içeriği kompostlaştırmayı zorlaştırırken, biyoçar yapımı Körfez bölgesindeki kumlu topraklara uygun enerji ürünlerinin yanı sıra toprak düzenleyici üretimi için de bir seçenektir. Biyoçar, toprağı zenginleştirmek için organik olarak oluşturulan en kararlı organik bileşiklerden biridir. Toprağın verimliliğini artırmak, nemi korumak, zehirli gaz emisyonunu azaltmak ve küresel ısınmayla mücadele etmek için tarımsal çiftlik artıklarını besleyici bir toprak gübresine dönüştürür (Badawi 2019) Hurma biyokütlesinin sürdürülebilir kullanımı için kapsamlı bir dizi termal, fizyokimyasal ve biyokimyasal teknik mevcuttur. Hurma kalıntılarının geri dönüşümü yeni bir teknoloji olmamakla birlikte, çevresel dengeyi korumayı amaçlayan çevre sistemi içindeki en önemli biyolojik süreç olarak kabul edilmektedir. Mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilen biyolojik faaliyetler, tarımsal atıkları toprağı aktararak toprağı zenginleştirmek ve ekosistemdeki dengeyi yeniden sağlamak için en güvenli ve en başarılı yöntemlerdir. Düşük maliyeti ve hurma kalıntılarını ekonomik getiriye dönüştürmesi nedeniyle biyoçar, hurma atıklarının temizlenmesi sorunlarını en aza indirme potansiyeline sahiptir.

4.2. MALAHİT YEŞİLİ

Malahit Yeşili ($C_{23}H_{25}ClN_2$), su için zararlıdır (Li vd., 2018). Malahit yeşilin molekül ağırlığı yaklaşık olarak 364.91 g/mol'dür (Naseeruteen vd., 2018). Bu, yeşil kristal toz şeklinde görünen ve triphenylmethane grubuna ait olan su çözüner bir katyonik boyadır (Raval vd., 2017). MG'nin maksimum dalga boyu 618 nm'dir. MG, kimyasal, gıda işleme ve ilaç endüstrilerinde geniş bir uygulama bulmuştur. Yaygın kullanımına rağmen, MG'nin suda uzun süreler boyunca kalıcı olan ve mikropların parçalaması zor olan zararlı özellikleri vardır. Sonuç olarak, MG'nin insanlara ve çevreye verdiği zararı sınırlamak için, MG'nin atık sularından uzaklaştırılması uzun süredir çevre çalışmalarının odak noktası olmuştur (Qu vd., 2019).



Şekil 4.1. Malahit Yeşili'nin moleküler yapısı (Sismanoglu vd., 2023)

BÖLÜM 5

LİTERATÜR TARAMASI

5.1. ÇEŞİTLİ BİYOABSORBENTLER İLE MALAHİT YEŞİLİN UZAKLAŞTIRILMASINA İLİŞKİN ÇALIŞMALARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Rangabhashiyam ve Balasubramanian (2018), araştırmalarında, *Peltophorum pterocarpum* meyve kabuklarının sodyum hidroksitle işlenerek malahit yeşilin (MG) biyosorpsiyonu için kullanımını incelemişlerdir. Biyosorbentleri Çevresel Taramalı Elektron Mikroskobu (E-SEM) ve X-ışını Difraktometresi kullanarak karakterize etmişlerdir. Çalışma, partikül biyosorpsiyon sisteminde MG uzaklaştırma performansını, değişen işlem parametreleriyle değerlendirmiştir. Langmuir modeli, sodyum hidroksit ile işlenmiş biyokütle için maksimum alım kapasitesi olarak 62.50 mg/g'yi açıklamaktadır. Deneysel verileri en iyi şekilde uyum sağlayan model ise ikinci derece kinetik model olup, mekanizma olarak kemisorpsiyonu işaret etmektedir. Termodinamik analiz, MG'nin sodyum hidroksitle işlenmiş biyokütle üzerine biyosorpsiyonunun endotermik ve spontan doğasını göstermiştir. Kullanılan koşullar, değişen başlangıç çözeltisi pH'sı, karıştırma hızı, sıcaklık (303 K ile 333 K arasında değişen) ve başlangıç MG konsantrasyonu (20 ila 100 mg/L arasında değişen) içermektedir. Sonuçlar, Langmuir modelinin denge verilerini en iyi şekilde açıkladığını göstermiş ve özellikle modifiye formda *Peltophorum pterocarpum* meyve kabuklarının, kontamine suyun içinden MG'nin etkili bir şekilde uzaklaştırılmasında potansiyel gösterdiğini ortaya koymuştur.

Aziz vd. (2023), araştırmalarında, pirinç kabuğundan sentezlenen nanobiyoçarın, sudan boyaların uzaklaştırılması için potansiyelini incelemişlerdir. Biyoçar, 600°C'de 2 saat boyunca piroliz ile üretilmiş ve daha sonra ultrasonikasyon ve santrifüjleme

teknikleri kullanılarak nanobiyöçar haline getirilmiştir. Nanobiyöçar, silikon mineralleri açısından zengin kristalin bir yapı sergilemiştir. Çalışma, nanobiyöçar ile safranin, malahit yeşili ve her iki boyanın karışımının farklı koşullar pH ve sıcaklık altında uzaklaştırılmasını değerlendirmiştir. Sonuçlar, nanobiyöçarın boyalar için yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu, maksimum uzaklaştırma yüzdelerinin sırasıyla %91.7, %87.5 ve %85 olduğunu göstermiştir. Boya uzaklaştırma için optimal koşulların, nötr pH, 50°C sıcaklık ve 20 mg nanobiyöçar dozu ile 30 dakika temas süresi olduğu bulunmuştur. Kinetik çalışmalar, adsorpsiyon sürecinin ikinci derece modeli takip ettiğini ve kimyasal adsorpsiyonu önerdiğini göstermiştir. Çalışma, pirinç kabuğundan elde edilen nanobiyöçarın endüstriyel atıklardan boyaların uzaklaştırılması için etkili ve çevre dostu bir adsorbent olabileceğini sonuçlandırmıştır. Ancak, nanobiyöçar üretiminin ve uygulamasının ölçeklendirilmesi, ekonomik fizibilite ve çevresel etkiler gibi potansiyel zorlukların ele alınması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç bulunmaktadır.

Saha vd. (2010), çalışmalarında, tamarind meyve kabuğunun düşük maliyetli bir biyosorban olarak sulu çözeltilerden malahit yeşilin uzaklaştırılmasında kullanılmıştır. Karıştırma, pH, başlangıç boyası konsantrasyonu, temas süresi ve sıcaklık gibi faktörler incelenmiştir. Çalışma, pH ve sıcaklığın boyaların adsorpsiyon kapasitesini önemli ölçüde etkilediğini, Langmuir izoterm modelinin verilere en iyi uyum sağladığını, 303 K'de maksimum adsorpsiyon kapasitesinin 1.951 mg/g olduğunu göstermiştir. Kinetikler, ikinci derece modeli izlemekte olup, tahmini aktivasyon enerjisi 63.56 kJ/mol'dür. Termodinamik analiz, işlemin spontan ve ekzotermik olduğunu önermiştir. Biyosorban olan tamarind meyve kabuğu, yıkama, kurutma ve elemelerle hazırlanmış olup, karakterizasyonu bileşimini ve morfolojisini doğrulamıştır. Toplu adsorpsiyon deneyleri, karıştırma, pH, başlangıç boyası konsantrasyonu, biyosorban dozu, temas süresi ve sıcaklığın adsorpsiyon süreci üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Sonuçlar, daha yüksek karıştırma hızlarının ve pH değerlerinin adsorpsiyonu desteklediğini, artan başlangıç boyası konsantrasyonunun başlangıçta adsorpsiyon kapasitesini artırdığını, ancak daha yüksek konsantrasyonlarda artış gösterdiğini, biyosorban dozunun artmasıyla adsorpsiyon kapasitesinin azaldığını, ancak temas süresinin uzamasıyla arttığını ve sıcaklığın da adsorpsiyonu etkilediğini, daha yüksek sıcaklıkların adsorpsiyon hızını

azalttığını göstermiştir. Maliyet analizi, tamarind meyve kabuğunun aktif karbon gibi ticari adsorbentlere düşük maliyetli bir alternatif olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, tamarind meyve kabuğu, sulu çözeltilerden malahit yeşilin uzaklaştırılması için etkili ve ekonomik bir biyosorban olarak potansiyel göstermektedir.

Sudhakaran vd. (2022), araştırmalarında, lignoselülozik substratlardan etanol üretimi sırasında sakarifikasyon sürecinden elde edilen lignin açısından zengin katı kalıntıları incelenmiştir. Hindistan cevizi kabuğu ve Bit lifi atığından elde edilen bu kalıntılar, biyoçar üretmek için 350°C'de pirolize edilmiştir. Biyoçar karakterize edilmiş ve atıksulardan malahit yeşili boyasını uzaklaştırmada etkinliği incelenmiştir. FTIR ve XRD spektrumları, biyoçarın yüzeyinde çeşitli fonksiyonel grupların olduğunu gösterirken, SEM görüntüleri poroz yapısını ortaya koymuştur. Hindistan cevizi kabuğu biyoçarı (CPB) için %99.5 ve Bit Lif Biyoçarı (BFB) için %99.4'lük maksimum boya uzaklaştırma verimleri, 100 mg/l boyasının konsantrasyonunda 24 saat içinde elde edilmiştir. pH'nın 4'e ayarlanması, CPB için %99.7 ve BFB için %99.6'lık bir uzaklaştırma verimine daha fazla katkı sağlamıştır. Adsorpsiyon, ikinci derece kinetiklere ve Langmuir izoterm modeline uymaktadır. Elemental analiz, her iki biyoçarda yüksek karbon içeriği gösterirken, CPB'nin daha yüksek oksijen yüzdesine sahip olduğunu göstermektedir. CPB, daha yüksek O/C, H/C ve (O+N)/C oranlarıyla daha yüksek bir polariteye sahiptir. Her iki biyoçar da Malahit Yeşili'nin etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlayarak, boyama atıkları için maliyet etkin adsorplayıcılar haline gelmiştir. Çalışma, etanol üretiminden atık substratların su kaynağı koruması için sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını önermektedir.

Lemos vd. (2023), çalışmalarında, üzüm sapının doğal sulardan ve endüstriyel atıklardan malahit yeşilin uzaklaştırılması için bir biyosorban olarak incelenmiştir. Merkezi kompozit tasarımı kullanılarak yapılan optimizasyon, pH 5 ve 0.80 g L⁻¹ biyoçar dozu ile %87.7'lik bir uzaklaştırma yüzdesine ulaşıldığını ortaya koymuştur. Kinetik çalışmalar, verilerin en iyi şekilde ikinci derece modelle uyduğunu ve Langmuir denge modelinin 214.2 mg g⁻¹ maksimum biyosorpsiyon kapasitesini gösterdiğini belirtmiştir. Termodinamik analiz, sürecin olumlu, spontan ve ekzotermik olduğunu önermiştir. Gerçek örneklerde uygulama, doğal sularda %58.0'den fazla ve tekstil atıklarında %82.0'den fazla uzaklaştırma yüzdelerini

göstermiştir. Genel olarak, üzüm sapı, atıksu arıtımı için etkili ve çevre dostu bir biyosorban olarak umut vaat etmektedir.

Barría vd. (2023) araştırmalarında, pirinç kabuğu (BRH) ve yabani şeker kamışı (BWS) biyoçar'ları, su üzerinde malahit yeşili boyası (MG) ve arsenit [As (III)] için adsorbent olarak değerlendirilmiştir. Gazlaştırma yoluyla elde edilen BRH ve BWS biyoçar'ları, sulu çözeltilerden MG ve arsenitin uzaklaştırılması için umut verici sonuçlar göstermiştir; MG için sırasıyla %61.99 ve %97.46, arsenit için ise %82.79 ve %82.36 uzaklaştırma yüzdeleri sağlamıştır. Toplu adsorpsiyon çalışmaları, 120 dakikalık temas süresinin adsorpsiyon dengesine ulaşmak için yeterli olduğunu göstermiştir. Gazlaştırma işlemi, Panama'daki Molino el Anhelu'dan ve Panama'daki Chilibre'den yerel olarak elde edilen pirinç kabuğu (RH) ve yabani şeker kamışı (WS) biyoçar kaynaklarından seçilmiştir. Adsorpsiyon kapasitesi değerleri, MG boyası için sırasıyla 18.57 ve 29.19 mg·g⁻¹, arsenit için ise 24.84 ve 24.71 mg·g⁻¹ olarak belirlenmiştir. Denge, 120 dakikada sağlanmış ve BWS için %90'dan fazlası ilk 10 dakikada gerçekleşen uzaklaştırmanın ardından ulaşılmıştır. Pseudo-ikinci derece model, adsorpsiyon sürecini en iyi şekilde açıklamış ve baskın mekanizmanın kimisorpsiyon olduğunu önermiştir. Adsorpsiyon sonrası analiz, MG boyası ve arsenit üzerinde -OH, C = O ve C = C gibi fonksiyonel grupların katılımını ortaya koymuştur. Bu bulgular, BRH ve BWS biyoçar'larının etkili ve düşük maliyetli su arıtımı için potansiyelini vurgulamaktadır, kirlilik giderimi için çevre dostu bir çözüm sunmaktadır.

Deniz ve Kepekci (2017) araştırmalarında, çam, meşe, gürgen ve köknar talaş biyokütlelerinden oluşan CTAB-modifiye çok bileşenli bir biyosorbanın, sulu çözeltilerden malahit yeşilin (MG) uzaklaştırılması için uygulaması incelenmiştir. pH, boya konsantrasyonu, biyosorban miktarı ve temas süresi gibi çeşitli parametrelerin etkileri araştırılmıştır. Biyosorpsiyon izoterm verileri, farklı modeller kullanılarak analiz edilmiş, Sips izotermi ve lojistik model verilere iyi uyum sağlamıştır. Maksimum biyosorpsiyon kapasitesi, optimize edilmiş koşullar altında 52.610 mg g⁻¹ olarak bulunmuştur. Biyosorpsiyon kinetiği, farklı denklemler kullanılarak modellenmiş, lojistik model deneysel verilere en iyi uyum sağlamıştır. Termodinamik çalışmalar, biyosorpsiyon sürecinin spontan ve fiziksel olduğunu

göstermiştir. SEM ve FTIR kullanılarak yapılan karakterizasyon çalışmaları, biyosorbanın sulu çözeltiden MG'yi uzaklaştırmada etkili olduğunu doğrulamıştır. Genel olarak, CTAB modifiye çok bileşenli biyosorban, MG'nin uzaklaştırılması için umut vaat eden potansiyele sahiptir ve tehlikeli boyalarla kontamine su kütlelerinin temizlenmesi için uygun bir adaydır.

Malhotra vd. (2022) çalışmalarında, palmiye yaprakları, sulu çözeltilerden malahit yeşil (MG) boyasının uzaklaştırılması için bir biyosorban olarak kullanılmıştır. Çalışma, biyosorban dozu, başlangıç boya konsantrasyonu, pH ve temas süresi gibi çeşitli faktörlerin boyanın uzaklaştırılma verimliliği üzerindeki etkisini incelemiştir. Deneyde kullanılan palmiye yaprağı tozu, Hindistan'da Jaipur'dan bir tedarikçiden elde edilmiş, bir saat boyunca 60°C'de kurutulmuş ve daha sonra ileri kullanım için saklanmıştır. Deneyde, 0.05 ila 0.5 g arasında değişen miktarlarda palmiye yaprağı tozu kullanılmış ve 0.1, 0.2, 0.5 ve 1 ppm olan MG boya konsantrasyonları kullanılmıştır. Çözeltilerin pH değerleri 2 ila 12 arasında değişmekte olup, 0.1 N HCl ve 0.1 N NaOH kullanılarak ayarlanmıştır. Spektroskopik ve morfolojik analiz, palmiye yaprağı tozunun artmış yüzey alanına sahip mikroporöz bir yapıya sahip olduğunu ve bu nedenle boyanın adsorpsiyonu için etkili olduğunu göstermiştir. Araştırma, biyosorban dozu, başlangıç boya konsantrasyonu ve pH'ya bağlı olarak adsorbe edilen boya yüzdesinin değiştiğini bulmuştur. Maksimum boya uzaklaştırma verimliliği, 60 dakikalık temas süresi içinde %95 olarak gözlemlenmiştir. Palmiye yapraklarının adsorbent olarak maksimum kapasitesi 149.19 mg/g olarak bulunmuştur. Araştırma, adsorpsiyon hızının psödo-ilk derece kinetiği takip ettiğini sonuçlamıştır. En iyi sonuçlar, pozitif yüklü adsorbent ve boya molekülleri arasındaki elektrostatik itme kuvveti nedeniyle daha yüksek pH seviyelerinde elde edilmiştir. Ayrıca, palmiye yapraklarının konsantrasyonunun ve çalkalama süresinin artırılması, boya uzaklaştırma verimliliğini artırmıştır. Ancak, başlangıç MG konsantrasyonunun artması, uzaklaştırma verimliliğinin azalmasına neden olmuştur.

Dai vd. (2018) araştırmalarında, kalsiyum açısından zengin biyoçar (CRB), atıksulardan boyaların uzaklaştırılması için düşük maliyetli bir adsorplayıcı olarak incelenmiştir. CRB, herhangi bir modifikasyon olmadan basit bir piroliz prosesi ile doğrudan yengeç kabuklarından hazırlanmıştır. Toplu adsorpsiyon deneyleri,

CRB'nin hem katyonik malahit yeşili (MG) hem de anyonik Congo red (CR) boya ları için yüksek adsorpsiyon kapasiteleri ve hızlı adsorpsiyon hız ları sergilediğini göstermiştir. Özellikle, CRB sırasıyla MY için 12,502 mg/g ve CR için 20,317 mg/g adsorpsiyon kapasiteleri göstermiştir. CRB üzerine CR'nin adsorpsiyon dengesi, CRB üzerine CR'nin adsorpsiyon dengesi CRB'de sadece 2 dakikada elde edilebilmiştir. Adsorpsiyon mekanizması, elektrostatik çekim, hidrojen bağ lanma ve π - π etkileşimi ile ilişkilendirilmiştir. CRB'nin benzersiz çok katmanlı yapısı, düşük karbon-azot oranı, yüksek zeta potansiyeli ve büyük grafitten oluşan alan boyutu, mükemmel adsorpsiyon performansına katkıda bulunmuştur. pH'nin boya ların adsorpsiyonu üzerindeki etkileri, nötrden alkali pH koşullarının MG adsorpsiyonunu teşvik ettiğini, asidik koşulların ise CR adsorpsiyonunu teşvik ettiğini göstermiştir. Kinetik çalışmalar, MG adsorpsiyonunun kimyasal adsorpsiyonunun hız sınırlayıcı adımı olduğunu, CR adsorpsiyonunun ise fiziksel bir süreç olduğunu göstermiştir. Her iki boya için Langmuir izoterm modeli, Freundlich modelinden daha iyi uymuştur, bu da homojen bir CRB yüzeyini önermektedir. Araştırma, ucuz kaynağı, basit sentez prosesi ve mükemmel adsorpsiyon performansı nedeniyle CRB'nin, atıksulardan boya ların uzaklaştırılması için pratik uygulamalarda umut vaat ettiğini sonuçlamıştır.

Shah vd. (2022) çalışmalarında, pamuk sapı (PS) biyoşarının atıksulardan malahit yeşilin (MG) uzaklaştırılması için umut verici bir adsorplayıcı olarak ortaya çıktı. Bulguları, başlangıç MG konsantrasyonunun yükselmesi, adsorpsiyon sıcaklığı ve adsorbent ağırlığının artmasıyla birlikte, başlangıç MG konsantrasyonu 100 mg/L'de dikkate değer bir aralıkta 35–40 mg/g'ye ulaştığını ortaya koydu. Adsorpsiyon süreci modellemesi için Freundlich ve Temkin izoterm modellerini kullanan araştırmacılar, artan sıcaklıklarda endotermik bir süreç ve artan sıcaklıklarda artan spontanelik ile karşılaştılar, entalpi ve entropi değ iş ikliklerinin sırasıyla 57,697.25 J/mol ve 177.768 J/mol olarak hesaplandı. Adsorpsiyon süreci, psödoikinci derece kinetiklerle yönetildi ve ana difüzyon mekanizması olarak film difüzyonu tanımlandı. Ayrıca, harcanmış PS biyoşarının mikrodalga destekli rejenerasyonuna yönelik incelemeler, mikrodalga gücüne bağlı olarak %21 ila %76 verim elde etti ve daha yüksek güçlerin gözenek bozulmasına ve azalan adsorpsiyon kapasitesine neden olduğu görüldü. Bu ç ığ ır aç ıcı ç alış ma, 500°C'de piroliz ile elde edilen ve <2 mm boyutunda partiküller

elde etmek için süzölen PS biyoçarını kullandı. Başlangıç MG konsantrasyonları ve sıcaklıklarında gerçekleştirilen partiköl ağırlığının değişimini içeren toplu adsorpsiyon deneyleri, bu parametrelerin boyanın uzaklaştırılma verimliliği üzerindeki önemli etkisini aydınlatmıştır. Bu bulgular, PS biyoçarının atıksu arıtımı için etkili ve sürdürülebilir bir çözüm olarak potansiyelini vurgulamaktadır ve daha geniş çevresel iyileştirme çabaları için önemli sonuçlar doğurur.

Hammud vd. (2023) araştırmalarında, hidrotermal karbonlaştırma (HTC) yoluyla palmye yapraklarından elde edilen biyoçar, Malahit Yeşili boyası (MG) için etkili bir adsorbent olarak hizmet etmiştir. HTC biyoçarı, karbonizasyon sıcaklığına bağlı olarak 24.81 MJ/kg'ye kadar yüksek ısı değerine sahipti. H₂O₂ oksidasyonu ile aktive edilmiş biyoçar (AHTC), 25°C'de MG için 45.59 mg/g olan HTC biyoçarını aşan, dikkate değer bir adsorpsiyon kapasitesine ulaşarak 62.80 mg/g'ye ulaşmıştır. Adsorpsiyon için optimum pH değeri olarak 7–8 belirlenmiştir. Langmuir izotermi uyumu, AHTC için 62.80 mg/g'lik maksimum adsorpsiyon kapasitesini göstermiş, bu da tek katmanlı bir kaplama anlamına gelmektedir. Adsorpsiyon süreci, spontane olarak gösterilen ΔG_0 ile psödoikinci derece kinetiklere uymuştur. Toplu deneyler, 66 ppm konsantrasyonda AHTC'nin maksimum adsorpsiyon kapasitesini %88'e kadar göstermiştir. Ayrıca, sütun çalışmaları, sürekli MG uzaklaştırma ile AHTC'yi sergilemiş ve HTC-MG etkileşimlerinin lehine olduğunu doğrulayan hesaplama analizleri ile desteklenmiştir. Genel olarak, çalışma, HTC biyoçarının MG'nin sulu çözeltilerden uzaklaştırılması için maliyet etkin ve verimli bir adsorplayıcı olarak potansiyelini vurgular.

Das vd. (2020) araştırmalarında, Hint Neem yaprağı tozu (NLP), *Azadirachta indica* üzerinde malahit yeşil (MG) boyasının adsorpsiyonunu araştırmak için yanıt yüzey metodolojisi (RSM) kullanılmıştır. Çalışma, çözüm konsantrasyonunu 10 ila 100 mg/l arasında değiştirme ve 618 nm dalga boyunda spektrofotometre kullanarak MG'nin uzaklaştırma yüzdesini belirleme sürecini içermiştir. Optimal koşulların belirlenmesi için Design Expert 11.0 kullanılarak MG adsorpsiyonu için optimal koşulların incelendiği bir merkezi kompozit tasarımın 2 faktörlü etkileşim modeli kullanılmıştır. Sayısal optimizasyon, hedeflenen boyanın uzaklaştırılması için optimal koşulları belirlemiştir. Deneysel sonuçlar, NLP'nin maksimum adsorpsiyon

kapasitesinin pH, boya konsantrasyonu, adsorbent partikül boyutu ve aktivasyon yöntemi de dahil olmak üzere çeşitli işletme parametrelerine bağlı olduğunu göstermiştir. NLP'nin, 33.33'ten 66.72 mg/g'a kadar adsorpsiyon kapasitesini artırmak için seyreltik HCl ile aktive edilmesinin, adsorpsiyon sürecinin psödoikinci derece kinetikleri izlediğini bulmuştur. Ayrıca, adsorpsiyon sürecinin endotermik ve spontan olduğu gözlemlenmiştir. İnce toz halindeki NLP'nin, sulu çözeltilerden MG'nin uzaklaştırılması için son derece etkili olduğu belirlenmiştir. Yüzey morfolojisi ve fonksiyonel gruplarının analiz edilmesi için taramalı elektron mikroskopisi (SEM), Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve enerji dispersif X-ışını analizi (EDX) gibi karakterizasyon teknikleri kullanılmıştır. Çözelti konsantrasyonları ve temas süresinin boya uzaklaştırma üzerindeki etkisi incelenmiş, çözelti konsantrasyonunun artmasıyla uzaklaştırma miktarının azaldığı ve daha yüksek pH değerlerinin adsorpsiyonun artmasına neden olduğu görülmüştür. Ayrıca, sıcaklığın boya uzaklaştırma üzerindeki etkisi araştırılmış, sıcaklığın artmasıyla uzaklaştırma yüzdesinin azaldığı, bu durumun eksotermik bir adsorpsiyon sürecini işaret ettiği görülmüştür. Çalışma, aktive NLP'nin, endüstriyel atıklardan kanserojen boyaların uzaklaştırılması için mükemmel bir potansiyele sahip olduğunu ve çevresel korumaya katkıda bulunduğunu sonuçlamıştır.

Bayram vd. (2023) çalışmalarında, yazarlar zararlı boyaların sudan uzaklaştırılması için nano-manyetik *Tamarindus indica* meyve çekirdeği biyoçarı ile demirin birleştirilmesine odaklandılar ve yeşil nano-manyetik/biyoçar kompozitini (nM-BC) oluşturdular. Model boyalar olarak metil mavi (MB) ve malahit yeşil (MG) kullandılar. Langmuir izotermi, doymuş adsorpsiyon kapasiteleri olarak MB ve MY için sırasıyla 3,326 mg/g ve 20,408 mg/g (nM-BC için) ve sırasıyla 3,055 mg/g ve 5,577 mg/g (BC için) ile adsorpsiyon denge verilerine iyi uyum sağladı. Adsorpsiyon süreci, psödoikinci derece kinetikleri takip etti ve hem BC hem de nM-BC dört döngüde iyi yeniden kullanılabilirlik gösterdi. FT-IR ve SEM analizleri biyoçar ve nano-manyetik biyoçarın modifikasyonunu ve karakterizasyonunu doğruladı. Çalışma, nano-demir ile zenginleştirilmiş biyoçarın, yeşil bir üretim yöntemi kullanılarak boya uzaklaştırma için etkili bir yaklaşım sunduğunu sonuçlandırdı. Araştırmada kullanılan biyokütle, farklı sıcaklıklarda (350, 400 ve 450 °C) yavaş piroliz karbonizasyonu ile üretilen *Tamarindus indica* meyve çekirdeği biyoçarıydı.

Üretim için ideal sıcaklık olarak 450 °C bulundu. Piroliz süreci, 450 °C'de, oksijensiz bir fırında 4 saat sürdü ve 0.20–0.4 mm boyutunda kurutulmuş *Tamarindus indica* meyve çekirdeklerinden 100 g kullanıldı. Elde edilen kömür, deiyonize su ile tekrar tekrar temizlendi ve 80 °C'de 24 saat kurutuldu. Çalışma, nano-demir ile zenginleştirilmiş biyoşarın, yeşil bir üretim yöntemi kullanılarak boya uzaklaştırma için etkili bir yaklaşım sunduğunu sonuçlandırdı.

Ren vd. (2016) araştırmalarında kullanılan numune, distile su ile yıkanma, kaynatma, süzme ve kurutma yöntemleri kullanılarak elde edilen sarımsak köküyüdü. Kurutulmuş malzeme daha sonra istenen örgü boyutuna öğütüldü ve süzüldü. Araştırmada kullanılan koşullar, 25 °C sıcaklık ve incelenen aralıkta pH seviyesini içeriyordu. En iyi sonuçlar, 2 g/L sarımsak kökü konsantrasyonu ve 50 mg/L MG konsantrasyonu ile elde edildi. Denge verileri, $R^2 > 0,99$ ile güçlü bir korelasyonu işaret eden Langmuir modeline iyi uyum sağladı. Adsorpsiyon kinetiği, $R^2 > 0,99$ ile psödoikinci derece denkleme uydu. MG'nin adsorplayıcı maksimum adsorpsiyon kapasiteleri, sırasıyla 1 ve 2 g/L sarımsak kökü ilavesi ile 172,41 ve 232,56 mg/g olarak belirlendi. Bu bulgular, sarımsak kökünün endüstriyel atıksulardan boya uzaklaştırmak için umut vaat eden düşük maliyetli bir adsorplayıcı olduğunu ve bakterilere ve bitkilere karşı toksisiteyi azaltmada önemli etkileri olduğunu göstermektedir.

Ng vd. (2016) araştırmalarında, *Luffa acutangula* kabuğu (LAP), sulu çözeltilerden malahit yeşil (Mg) boyasının uzaklaştırılması için düşük maliyetli doğal bir biyo-sorbent olarak değerlendirildi. LAP, *L.acutangula*'nın dış tabakasından elde edildi, yıkandı, kurutuldu, öğütüldü ve 100 ile 125 µm arasında değişen parçacık boyutlarını elde etmek için süzüldü. Biyo-sorpsiyon deneyleri, başlangıç pH'ının, dozajın, başlangıç konsantrasyonun, sıcaklığın ve temas süresinin MG biyo-sorpsiyonu üzerindeki etkilerini araştırdı. Langmuir modeli, maksimum adsorpsiyon kapasitesi olarak 69.64 mg/g ile MG biyo-sorpsiyonunu en iyi temsil etti. Kinetik analiz, kimyasal adsorpsiyonun bir göstergesi olan psödoikinci derece modelin iyi bir uyum sağladığını gösterdi. Biyo-sorpsiyon sürecinin endotermik ve spontan olduğu bulundu. MY uzaklaştırma için en uygun koşullar, 8 g/L dozaj, pH 4 başlangıç ve 50°C sıcaklıkta belirlendi. Bu koşullar, en yüksek biyo-sorpsiyon kapasitesine yol

açtı. Çalışma, LAP'ın, sulu çözeltilerden MG'nin uzaklaştırılması için etkili ve çevre dostu bir biyo-sorbent olabileceğini, tatmin edici bir biyo-sorpsiyon kapasitesi sağlayarak ön işlem gerektirmemesi gerektiğini sonuçlandırdı.

Fiala vd. (2021) çalışmalarında, *Helianthus annuus* tohum kabuklarının (HA-Ss) sulu ortamlardan malahit yeşil (MG) giderimi için doğal, maliyet-etkin ve çevre dostu bir adsorplayıcı olarak kullanımı araştırıldı. HA-Ss, FTIR, SEM ve ATG gibi teknikler kullanılarak karakterize edildi. Adsorpsiyon çalışmaları, adsorplayıcı kütlesi, ortam pH'ı, MG başlangıç konsantrasyonu ve sıcaklık gibi değişen fizikokimyasal koşullar altında gerçekleştirildi. MG giderimi için en uygun koşullar, 2,5 g/L HA-Ss, 20 mg/L MG başlangıç konsantrasyonu, pH 7 ve 60 dakika temas süresi olarak belirlendi ve %99'a kadar giderim verimi sağlandı. Kinetik modelleme, adsorpsiyon mekanizmasının psödoikinci derece kinetik modeli takip ettiğini gösterirken, adsorpsiyon izoterm modellerinin maksimum adsorpsiyon kapasitesi (Q_e) 7,69 mg/g olan Freundlich modelini takip ettiğini belirtti. HA-Ss yüksek porozite ve yüzey alanına sahipti, bu da adsorpsiyon sürecini kolaylaştırdı. Ayrıca, adsorplayıcı başarılı bir şekilde yeniden kazanma potansiyeline sahipti, ancak ardışık döngülerden sonra tutma kapasitesi biraz azaldı. Gerçek örnek testleri, HA-Ss'nin kirli suyun içinden MG giderimi için uygulanabilirliğini gösterdi ve suyun bileşimine bağlı olarak değişen verimlilikle sonuçlandı. Genel olarak, çalışma HA-Ss'nin sulu çözeltilerden etkili bir şekilde MG giderimi sağlayabileceğini ve boyar maddelerin kirliliğine karşı sürdürülebilir bir çözüm sunduğunu sonuçlandırdı.

Vigneshwaran vd. (2021) çalışmalarında, endüstrileşme ve nüfus artışı kaynaklı çevre kirliliği sorununa yanıt olarak, kirlenmiş suyun içinden boyar maddelerin giderilmesi için biyoçar temelli malzemelerin kullanımını araştırdılar. Kükürtlü tapioka kabuğu (S@TP) biyoçarı ürettir ve bu biyoçarın Malahit Yeşil (MG) ve Rodamin B (RhB) gibi organik boyar maddelerin giderimindeki etkinliğini test ettiler. Tapioka kabuğu biyokütle, oksijen kısıtlı koşullarda 800°C'de 3 saat pirolize edilerek biyoçar üretildi. Adsorpsiyon deneyleri, S@TP biyoçarın etkinliğini, MG için 30,18 mg/g ve RhB için 33,10 mg/g olarak gösterdi. Adsorpsiyon için optimum pH yaklaşık 8 idi ve doyumluk 120 dakika içinde elde edildi. Adsorpsiyon psödoikinci derece kinetiği ve Freundlich izoterm modelini izledi. Çeşitli karakterizasyon teknikleri malzemenin özelliklerini doğruladı. Sonuçlar, temas süresi

ile artan adsorpsiyon, optimum dozajın 100 mg olduğu ve maksimum adsorpsiyonun pH 8'de gerçekleştiği gösterildi. Adsorpsiyon mekanizması, elektrostatik çekim, yüzey etkileşimi ve hidrojen bağlanması içeriyordu. Sonuç olarak, sentezlenen S@TP biyoçar, suyun organik boyar maddelerden etkili ve yeniden kullanılabilir bir şekilde arındırılmasına yardımcı olan etkili bir çözüm sunmaktadır.

Deng vd. (2022) araştırmalarında, muz biyoçarı (BB) ve manioc biyoçarı (CB) muz ve manioc saplarının bir tüp fırında 400°C'de 2 saat pişirilmesiyle üretildi. Bu biyoçarlar daha sonra malahit yeşil (MG) üzerindeki adsorpsiyon etkileri için test edildi. Adsorpsiyon için optimal biyoçar miktarı 2 g/L olarak bulundu ve adsorpsiyon sürecini doğru bir şekilde yansıtan psödo-ikinci derece kinetiğin olduğu belirlendi. BB ve CB'nin teorik doygun adsorpsiyon kapasiteleri sırasıyla 1.092,80 mg/g ve 261,42 mg/g idi. Çeşitli karakterizasyon teknikleri, BB ve CB'nin MG için adsorpsiyon mekanizmalarının hem kimyasal hem de fiziksel adsorpsiyonu içerdiğini ortaya koydu. SEM analizi yüzey morfolojisindeki değişiklikleri gösterirken, element analizi yüzey fonksiyonel gruplarındaki farkları gösterdi. TG-DTG analizi termal bozunma davranışını gösterirken, BET analizi özgül yüzey alanındaki ve gözenek boyutu dağılımındaki değişiklikleri ortaya koydu. FTIR analizi adsorpsiyondan önce ve sonra yüzey fonksiyonel gruplardaki değişiklikleri gösterdi. XRD analizi kristal yapıdaki değişiklikleri ve TOC analizi MG ve türevlerinin giderimini doğruladı. Adsorpsiyon deneyleri analizi, biyoçarın optimal dozajının 2 g/L olduğunu ve pH'nin adsorpsiyon sürecini önemli ölçüde etkilediğini gösterdi. Adsorpsiyon kinetiği psödo-ikinci derece modelini izlerken, adsorpsiyon izoterm modelleri Freundlich modeli ile uyumlu oldu. Adsorpsiyon mekanizması, yüzey fonksiyonel gruplar tarafından kolaylaştırılan hem fiziksel gözenek doldurma hem de kimyasal etkileşimleri içeriyordu. Genel olarak, çalışma BB ve CB'nin kontamine suyun etkili bir şekilde MG'yi uzaklaştırmak için düşük maliyetli biyoçarlar olarak potansiyelini göstermiş ve atıksu arıtımı için umut verici bir çözüm sunmuştur.

Jabar ve Odusote (2024) araştırmalarında, su zambak saplarından aktive edilmiş biyoçar, fiziksel ve kimyasal tekniklerin bir kombinasyonu ile hazırlandı. Hazırlanan adsorplayıcı üzerinde çeşitli analitik yöntemler kullanılarak kapsamlı bir karakterizasyon yapıldı; bunlar arasında TGA, elementel analiz, FTIR, SEM, XRD

ve BET bulunmaktaydı. Optimal koşullar altında hazırlanan adsorplayıcı malahit yeşili (MG) boyar maddesinin adsorpsiyonu için partikül yöntemi kullanıldı. Bu optimal koşullar, başlangıç boyar madde konsantrasyonunun 100 mg/L, adsorbent dozunun 0,1 g/100 mL, temas süresinin 30 dakika, sıcaklığın 301 K ve karıştırma hızınının 200 rpm olduğu koşulları içermektedir. Kinetik ve denge modelleri en iyi şekilde sırasıyla psödo-ilk düzen kinetiği ve Langmuir izotermine uyum sağladı. Termo dinamik parametreler, adsorpsiyon sürecinin endotermik, spontan ve mümkün olduğunu gösterdi. Maksimum monokat tabaka adsorpsiyon kapasitesi (Q_{max}) 102.35 mg/g olarak bulundu. Diğer bitki kökenli aktif karbonlarla karşılaştırıldığında, su zambak sapı kökenli aktive biyoçar (WLSAB) boyar madde kontamine atık suların arıtılması için daha iyi bir potansiyel alternatif adsorplayıcı olarak kabul edildi. Araştırmada kullanılan biyokütle su zambak saplarıdır. Su zambakları bir tür sucul bitkidir ve saplar aktive biyoçar hazırlamak için kullanılmıştır. Piroliz, bir azot atmosferinde 50°C/dk ısıtma hızıyla 750°C'de 1 saat boyunca yapılmıştır. Fırın, azot gazından oksijen gazına geçmeden önce 650°C'ye kadar 50°C/dk oranında soğutulmuştur. Biyoçar daha sonra 20 dakika boyunca bu koşullarda tutularak aktive edilmiştir. Araştırma, hazırlanan adsorplayıcı kullanılarak sulu çözeltiden MG boyar maddesinin %99,25'lik bir giderimine ulaşmıştır. En iyi sonuç, daha önce belirtilen optimal koşullar altında 102,35 mg/g olan maksimum monokat tabaka adsorpsiyon kapasitesidir. Kinetik ve denge modelleri en iyi şekilde sırasıyla psödo-ilk düzen kinetiği ve Langmuir izotermine uyum sağladı. Termo dinamik parametreler, adsorpsiyon sürecinin endotermik, spontan ve mümkün olduğunu gösterdi.

Pandey vd. (2022) araştırmalarında, malahit yeşili boyar maddesinin çürütülmesi, lakkaz-immobilize çam iğnesi biyoçar kullanılarak incelenmiştir. Biyoçarın başarılı immobilizasyonu adsorpsiyon yoluyla elde edilmiş ve SEM-EDX ve FTIR ile doğrulanmıştır. 4U enzim kullanılarak pH 3 ve 30°C'de %78.1 bağlanma verimi ile 64.4 U/g yüksek lakkaz bağlanması elde edilmiştir. İmmobilize edilmiş enzim, 2–7 arası pH'de %50'den fazla, 65°C'de %45'ten fazla ve 4°C'de 4 hafta boyunca %55'ten fazla bağlanma aktivitesini korumuştur. Tekrar kullanılabilirlik testleri, 6 döngüden sonra %53 enzim korunumu göstermiştir. Çalışma, lakkaz-immobilize biyoçarın sulu çözeltide malahit yeşili boyar maddesinin çürütülmesi ve renklerin giderilmesi için kullanılmış, 5 saat içinde %85'in üzerinde bir giderim elde etmiştir. FTIR ve HPLC

analizleri boyar maddesinin parçalanmasını doğrulamış, GC-MS analizi metabolitlerin varlığını doğrulamıştır. Fitotoksisite analizi, orijinal boyar maddeye kıyasla daha az toksik metabolitlerin varlığını göstermiştir. Bu nedenle, lakkaz-immobilize biyoşar, suyun boyar maddelerden etkili bir şekilde temizlenmesi için verimli bir biyokatalizör olarak umut vadetmektedir. Kullanılan biyokütle, zayıf asit işlemi ile fonksiyonelleştirilmiş çam iğnesi biyoçarı idi. Lakkaz biyoçara adsorpsiyon yoluyla immobilize edilmiş ve enzim dozağı için pH, sıcaklık ve enzim optimize edilmiştir. Karakterizasyon, SEM ve FTIR analizini içermiştir. İmmobilizasyon koşullarının optimize edilmesi, en yüksek enzim immobilizasyonunu pH 3.0, 30°C ve 4U enzim dozunda göstermiştir. SEM görüntüleri önemli yüzey değışiklikleri göstermemiş, ancak immobilizasyon sonrası daha düz yüzeyler gözlemlenmiştir. Çalışma, lakkaz immobilize biyoçarın yüksek adsorpsiyon potansiyeli ve katalitik aktivitesi nedeniyle atıksu arıtımı alanında potansiyel uygulamalara sahip olduğunu ve ayrıca çürütölmüş metabolitlerin orijinal boyar maddeye kıyasla azalmış fitotoksisite gösterdiğini sonuçlamıştır.

BÖLÜM 6

MATERYAL VE METOD

6.1. HAMMADDE TEMİNİ VE KARAKTERİZASYONU

Hurma dalı atıkları Irak'tan toplandı. Malahit yeşili (Tablo 6.2'ye bakınız), Merck, Inc. tarafından temin edildi ve adsorpsiyon çalışmasında adsorbat olarak kullanıldı. Biyoçara aktivatör olarak kullanılan fosforik asit (H_3PO_4), Merck, Inc. tarafından temin edildi. Üç adsorbentin yüzeylerindeki fonksiyonel grupların karakterizasyonu, Fourier-dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FTIR) (Thermo Scientific Nicolet IS5 ID7 ATR, ABD) kullanılarak $4000-500\text{ cm}^{-1}$ aralığında gerçekleştirildi. Üç adsorplayıcının yüzey morfolojileri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM, Almanya) kullanılarak adsorpsiyon öncesi ve sonrasında incelendi. Adsorpsiyon çalışmaları, Persee T7DS marka çift ışın UV-Vis spektrometresi (PG Scientific, Inc., Auburn, ABD) kullanılarak gerçekleştirildi.

6.2. BİYOÇAR HAZIRLIĞI

Kuru hurma dalı atıkları öğütüldü. 1 mm'den küçük boyuttaki partiküller bir elektrikli fırın tarafından ısıtılan bir paslanmaz çelik piroliz reaktörüne yerleştirildi. Reaktör çıkışına iki toplama balonu takıldı. Piroliz deneylerinden önce reaktör, 30 dakika boyunca azot (N_2) taşıyıcı gaz ile temizlendi. Hurma dallarının pirolizi, bir azot akışı altında $5^\circ\text{C}/\text{dk}$ 'lik bir ısıtma hızıyla ve ısıtma sıcaklığına ulaşıldıktan sonra 2 saat boyunca sürdürülerek 400°C 'de gerçekleştirildi. Piroliz buharları, deneyler sırasında buz-su karışımı kullanılarak soğutulan toplama balonlarına yönlendirildi. Ardından ısıtma durduruldu ve reaktör, oda sıcaklığına ulaşana kadar soğutulduktan sonra biyoçar çıkarıldı.

6.3. MİKRODALGA DESTEKLİ PİROLİZ YOLUYLA BİYOÇAR AKTİVASYONU

Biyoçarın aktivasyon işlemi, bir mikrodalga destekli piroliz sistemi ve H₃PO₄ (85%) kullanılarak gerçekleştirildi. Başlangıçta, 1 g biyoçar, 1:0.05 (w/w) oranında H₃PO₄ çözeltisine eklenerek 10 dakika boyunca karıştırıldı. Daha sonra, karışım bir 250 mL kuvars balonuna aktarıldı ve bir mikrodalga fırınına yerleştirildi. Kuvars reaktör içindeki hava, 30 dakika boyunca N₂ akışı kullanılarak temizlendi. Aktivasyon, N₂ akışı altında 1260 MW'da 2 dakika boyunca gerçekleştirildi. Aktive edilmiş biyoçar, pH değeri 6'ya ulaşana kadar distile su ile birkaç kez yıkandı, süzüldü ve 103°C'lik bir fırında bir gece kurutuldu.

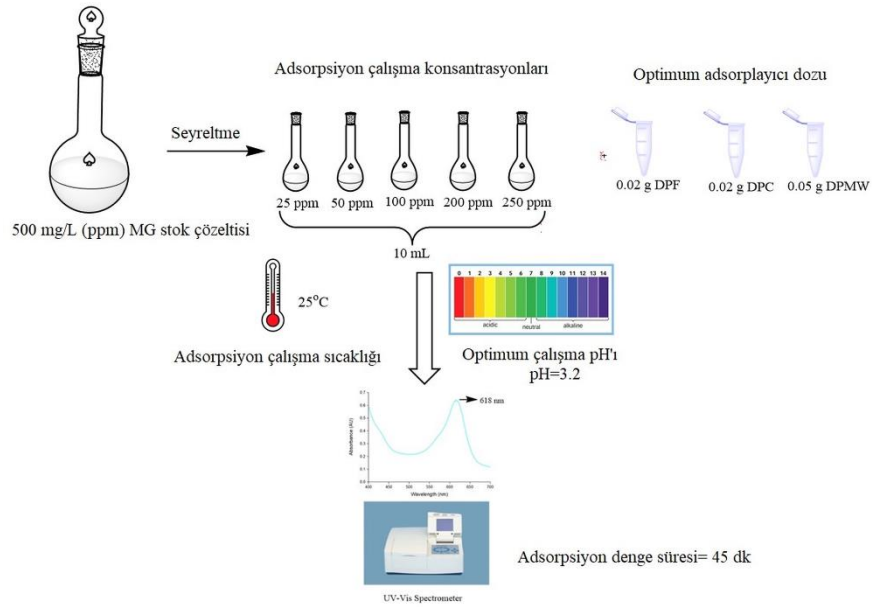
6.4. ADSORPSİYON ÇALIŞMALARI

Malahit yeşilin ham hurma, hurma biyoçar ve fosfatlı biyoçar üzerindeki adsorpsiyon çalışması, 25°C'de ve başlangıç konsantrasyon oranlarında (boyanın doğal pH'sı olan 3.2'de) 25 mg/L ve 250 mg/L'de gerçekleştirilmiştir. 500 mg/L'lik bir stok çözeltisi, 0.05 g boyar maddeyi 100 ml distile su içinde çözerek hazırlandı. Stok çözeltisinden 25-250 mg/L aralığında boyar çözeltiler seyreltilerek elde edildi. Adsorpsiyon çalışmaları, 10 ml hacmindeki boyar çözeltisi kullanılarak bir ısıtılmış çalkalama su banyosunda kontrol edildi. Optimal adsorplayıcı dozunu belirlemek için, üç adsorplayıcının her birinden 0.01 g, 0.02 g ve 0.05 g tartıldı ve 10 ml 25 mg/L boyar çözeltisine eklenmiştir. Ham hurma ve hurma biyoçar için optimal adsorplayıcı dozu 0.02 g olarak bulunurken, fosfatlı biyoçar için 0.05 g olarak bulunmuştur. Adsorpsiyon deneyleri sırasında, 4100 dev/dak hızla 15 dakika boyunca santrifüjlenen ve 618 nm'de UV-görünür spektrometre kullanılarak belirli zamanlarda ölçümler alınmıştır. Şekil 6.1. ve 6.2., deneysel adsorpsiyon sürecini ve mekanizmasını göstermektedir. Üç adsorplayıcı için adsorpsiyon denge süresi, ce (ppm) vs. t (dakika) grafiği kullanılarak 45 dakika olarak belirlenmiştir (Şekil 6.3.). Şekil 6.4. ve 6.5., biosorban dozu-malahit yeşil uzaklaştırma (%) ve pH-malahit yeşil uzaklaştırma (%) için grafikleri göstermektedir. Denge koşulundaki adsorpsiyon kapasitesi, Denklem 1 kullanılarak belirlenmiştir. Denge koşulundaki adsorpsiyon kapasitesi, Denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$q_e = \frac{(c_0 - c_e)V}{m}$$

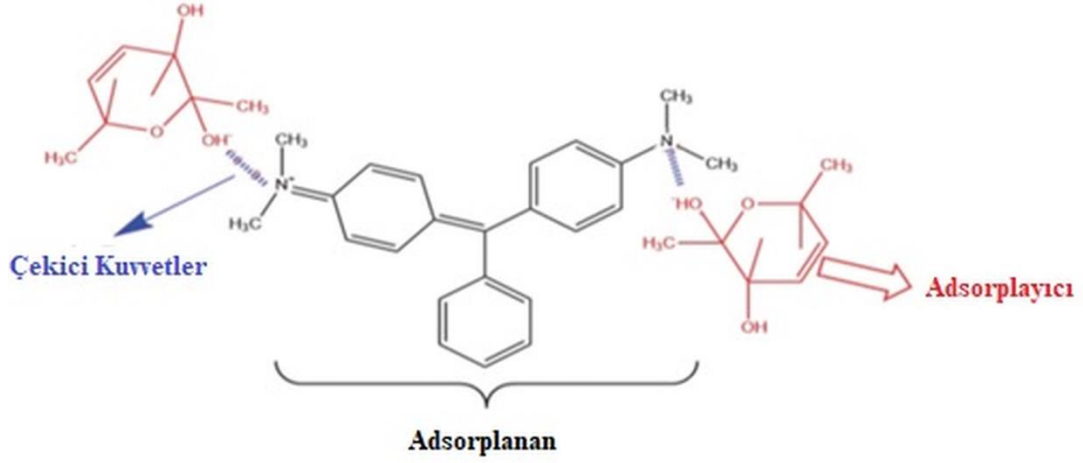
(6.1)

Burada: q_e = adsorpsiyon kapasitesi (mg/g), c_e = adsorpsiyon sonrası çözeltide kalan boyar madde konsantrasyonu (mg/L), c_0 = başlangıçta boyar maddenin konsantrasyonu (mg/L), V = toplam çözelti hacmi (L), m = adsorplayıcının kütlesi (g) (Akdemir vd., 2022; Karadeniz vd., 2023; Li vd., 2023; Ugraskan vd., 2022; Sismanoglu vd, 2023). Comparison of effective removal of cationic malachite green dye from waste water with three different adsorbents: date palm, date palm bioçar and phosphated bioçar. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1-20.).

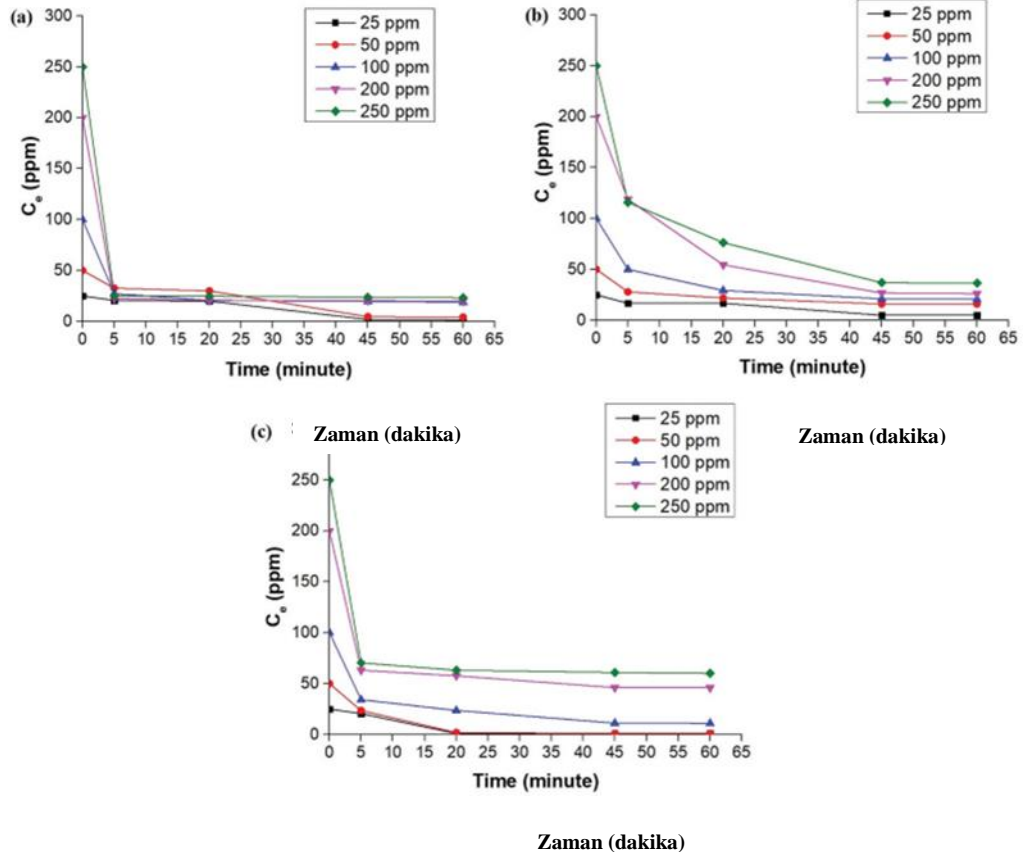


Şekil 6.1. Adsorpsiyon deneysel sürecinin şeması.(Sismanoglu vd, 2023)

Adsorpsiyon izoterm modelleri olarak, Freundlich, Langmuir, Temkin, Dubinin ve Radushkevich (D-R), Flory-Huggins (F-H) ve Frumkin-Fowler-Guggenheim (FFG) izoterm modelleri kullanılmıştır.

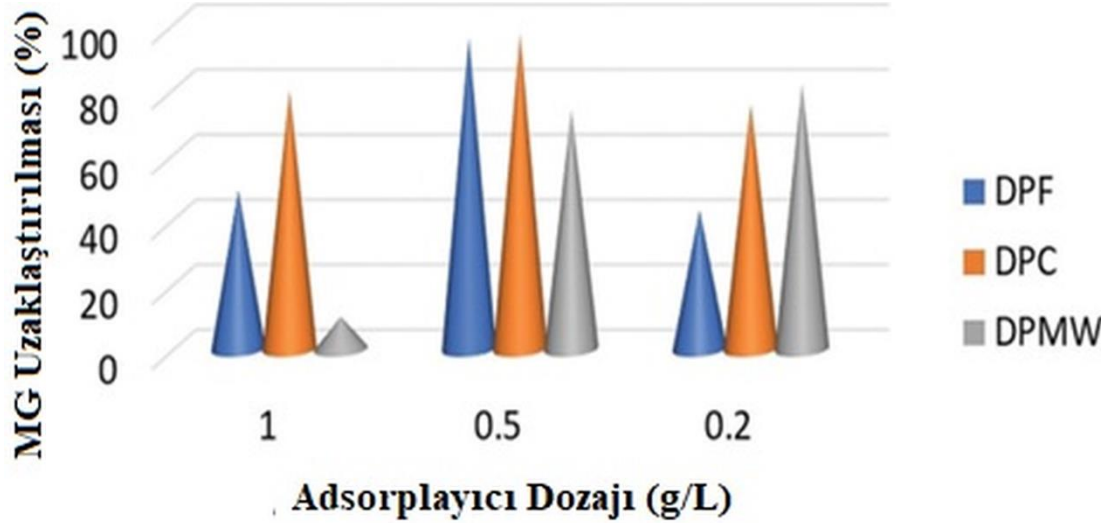


Şekil 6.2. Adsorplanan ve adsorplayıcı arasındaki adsorpsiyon mekanizmasının şeması. (Khan vd., 2023; Sismanoğlu vd, 2023)



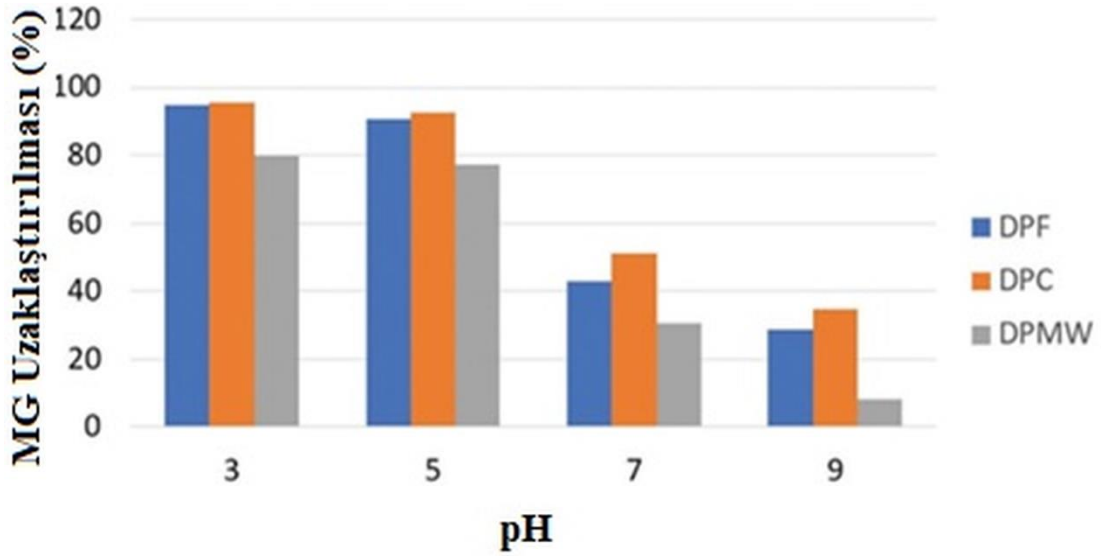
Şekil 6.3. c_e (ppm)'e karşılık zaman grafiği DPF (a), DPC (b), DPMW (c).

Şekil 6.4'te görüldüğü üzere, m/V oranlarına göre MG'nin yüzde adsorpsiyonu DPF ve DPC adsorplayıcıları için 0.5 g/L iken, DPMW adsorplayıcısı için 0.2 g/L'dir.



Şekil 6.4. Biyosorban (DPF, DPC, DPMW) doz-malahit yeşili giderimi (%).

Şekil 6.5'te, MG'nin yüzde adsorpsiyonu, üç adsorplayıcı için de pH = 3'te maksimum değerine ulaşmaktadır.



Şekil 6.5. pH-malahit yeşili giderimi (%).

6.5. ADSORPSİYON İZOTERMLERİ

Çalışmamızda kullanılan adsorpsiyon modelleri, lineer denklemler ve parametre tanımlamaları Tablo 6.1'de özetlenmiştir. İzotermlere ilişkin açıklamalar önceki çalışmalarımızda sunulmuştur (Sismanoglu vd., 2023).

Tablo 6.1. Adsorpsiyon izotermi açıklaması.

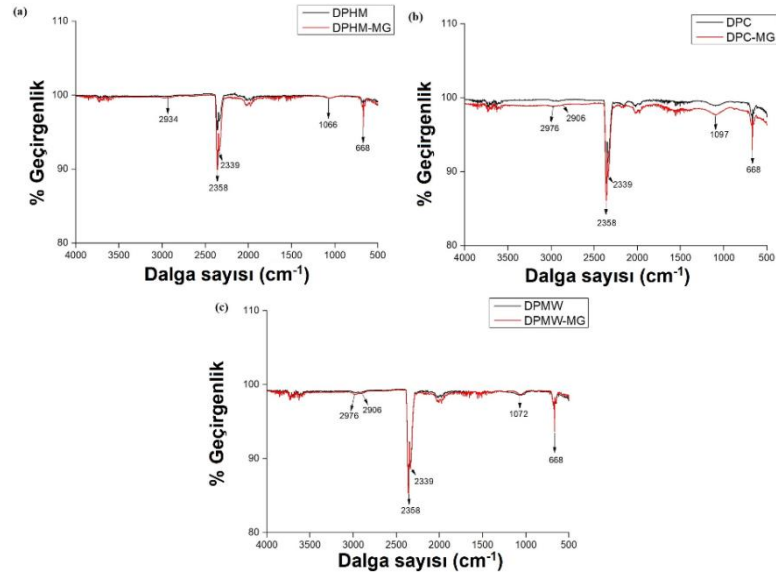
Adsorpsiyon Modelleri	Doğrusal Denklem	Parametre Tanımları
Freundlich	$\log q_e = \log K_F + n \log c_e$	K_F = Adsorption capacity (L/mg) (Duran vd., 2019; Sismanoglu vd., 2023) n = Adsorption intensity (REED & CLINE, 1994)
Langmuir	$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{max}} + \frac{1}{q_{max} K_L c_e}$	K_L = Affinity constant of the Langmuir isotherm (L/mg) (Duran vd., 2019; Sismanoglu vd., 2023) q_{max} = Maximum adsorption capacity (mg/g) (Duran vd., 2019; Sismanoglu vd., 2023)
Dubinini- Radushkevich(D-R)	$\ln q_e = \ln q_{max} - K_{D-R} \varepsilon^2$ $\varepsilon = RT \ln(1 + 1/c_e)$ $E = \frac{1}{\sqrt{2K_{D-R}}}$	K_{DR} = Adsorption energy constant (mol^2kJ^2) (Savran vd., 2017; Sismanoglu vd., 2023) ε = Pollanyi constant E = Adsorption energy per mole (kJmol^{-1}) (Savran vd., 2017; Sismanoglu vd., 2023)
Temkin	$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln K_T + \frac{RT}{b_T} \ln c_e$ $B = \frac{RT}{b_T}$ $\theta = \frac{RT}{\Delta Q_T} \ln K_T + \frac{RT}{\Delta Q_T} \ln c_e$	b_T = Temkin constant (kJ/molK) B = Adsorption potential (energy) related (kJ/mol) (Malkoc & Nuhoglu, 2007; Sismanoglu vd., 2023) K_T = Temkin isotherm constant (L/mg) (Kireç vd., 2021; Pursell vd., 2011; Sismanoglu vd., 2023) R = Gas constant (J/molK) θ = Ratio of the components adsorbed on the surface of the adsorbent (Kireç vd., 2021; Pursell vd., 2011; Sismanoglu vd., 2023)
Flory-Huggins(F-H)	$\log \left(\frac{\theta}{c_0}\right) = \log K_{F-H} + n \log(1 - \theta)$ $\theta = 1 - (c_e/c_0)$ $\Delta G = -2,303 RT \log K_{F-H}$	θ = Degree of surface coverage K_{FH} = isotherm constant (Saadi vd., 2015; Sismanoglu vd., 2023) n = number of ions at sorption sites (Saadi vd., 2015; Sismanoglu vd., 2023) ΔG = Gibb's energy (kJ/mol)
Frumkin or Fowler-Guggenheim (FFG)	$\ln \left[\left(\frac{c_e(1-\theta)}{\theta} \right) \right] = -\ln K_{FFG} + \frac{2W\theta}{RT}$	θ = Degree of surface coverage, K_{FFG} = isotherm constant (L/mg) (Ponnuchamy vd., 2020) W = energy interaction between adsorbed molecules (kJ/ mol) (Ponnuchamy vd., 2020)

BÖLÜM 7

BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. HURMA DALI (DPF), HURMA DALI BİYOÇARI (DPC) VE AKTİVE EDİLMİŞ BİYOÇAR (DPMW) 'NİN KARAKTERİZASYONU

Hurma dalı atığında (DPF) 3000–2855 cm^{-1} aralığında herhangi bir tepe gözlemlenmemişken (Şekil 7.1 (a)), MY'nin yapısındaki asimetrik $-\text{CH}_3$ grubunun C-H gerilmesinden kaynaklanan küçük, yuvarlak bir tepe ortaya çıkmıştır (Cheriaa vd., 2012). Ayrıca, hurma dalı atığı yapısındaki polisakkaritlere ve proteinlerle ilişkilendirilen karboksilik asit gruplarına atfedilen 2358 ve 2339 cm^{-1} 'de çift tepe gözlemlenmiştir (Khan vd., 2021). Bu tepe yoğunluklarının adsorpsiyon sonrasında belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu artışın, MG'nin hurma ağacına adsorpsiyonunu takiben tersiyer amin tuzlarının simetrik ve asimetrik titreşimleri tarafından etkilendiği düşünülmektedir (Cheriaa vd., 2012).



Şekil 7.1. DPF (a), DPC (b), DPMW (c) FTIR/ATR spektrumları.

Hücre duvarındaki selüloz, hemiselüloz ve lignin yapılarında 1066 cm^{-1} 'deki pikte C-O, C=C ve C-C-O gerilmelerinin mevcut olduğu gözlemlendi ve bu pikin adsorpsiyondan sonra herhangi bir değişiklik olmadı (Fang vd., 2015). Hurma ağacında 668 cm^{-1} 'deki pik, aromatik C-H düzleme dışı bükülme ile ilişkilendirilmiştir (Nandiyanto vd., 2019), ve bu pikin yoğunluğunda adsorpsiyon sonrasında artış gözlemlenmiştir (Cheriaa vd., 2012).

Piroliz nedeniyle lignin miktarının artmasıyla, lignin yapısındaki C-H gerilme pikleri 2976 ve 2906 cm^{-1} 'de hafif yoğunlukta ortaya çıkmıştır (Fang vd., 2015), adsorpsiyondan sonra boyar maddenin yapısındaki $-\text{CH}_3$ grubunun C-H gerilmesiyle yoğunluğu hafifçe artmıştır (Şekil 7.1 (b)) (Khan vd., 2021).

Hurma dalı atığı yapısındaki polisakkarit ve protein birimlerinin piroliz sonucu, 2358 ve 2339 cm^{-1} 'deki çift piklerin yoğunlukları karbon içeriğindeki artışla birlikte artmıştır (Khan vd., 2021). Bu çift piklerin yoğunlukları, MG içindeki tersiyer amin tuzlarıyla etkileşim sonucunda artmıştır.

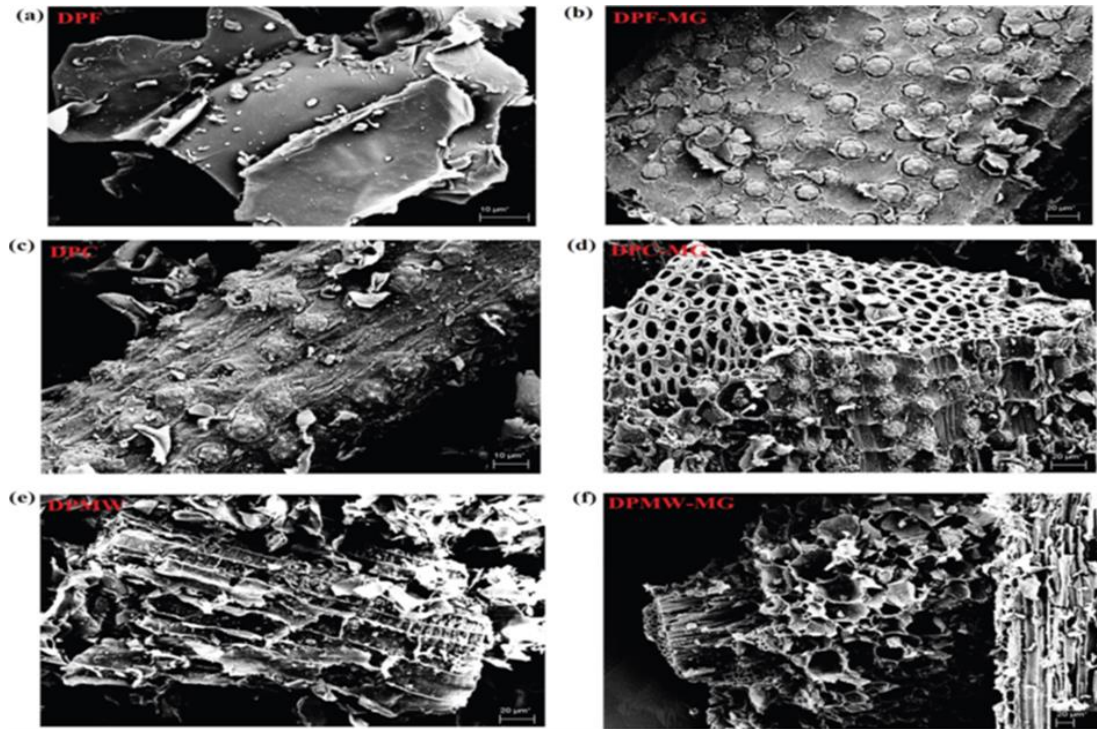
Selüloz, hemiselüloz ve lignin'deki C-O, C=C ve C-C-O gerilme pikleri hurma atığında 1066 cm^{-1} 'de piroliz sonucu daha yuvarlak bir pik oluşturacak şekilde 1072 cm^{-1} 'e kaymıştır (Fang vd., 2015). Adsorpsiyondan sonra bu pik, boyar maddenin yapısındaki tersiyer amin gruplarıyla reaksiyona girerek 1097 cm^{-1} 'e (C-N) kaymış ve keskin bir pik haline gelmiştir.

Benzer şekilde, hurma atığında, biyoçardaki adsorpsiyondan önce ve sonra gözlemlenen 668 cm^{-1} 'deki pik, aromatiklikteki C-H bükülmesine atfedilmiş olup, bu pikin yoğunluğu adsorpsiyondan sonra da artmıştır (Nandiyanto vd., 2019). 2976 ve 2906 cm^{-1} 'deki pikler, hurma adı atığının pirolizi sonucu lignin'deki C-H gerilme piklerine atfedilmiştir ve fosfatlama işlemiyle birlikte (Şekil 7.1 (c)) (Fang vd., 2015). Adsorpsiyondan sonra, pik daha belirgin hale gelmiş, ancak 2358 ve 2339 cm^{-1} 'deki piklerin yoğunluklarında herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

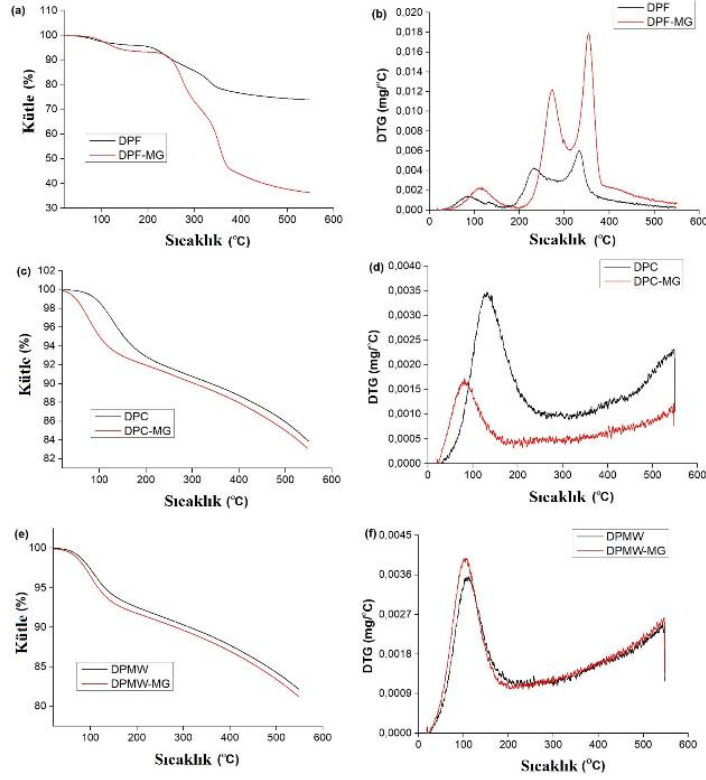
Fosfatlama yüzey işlemi görmüş biyoçardaki 1072 cm^{-1} 'deki pikin biyoçar ve hurma dalı atığının FTIR/ATR'leriyle karşılaştırıldığında, fosfat iyonlarının (Nandiyanto

vd., 2019) asidik fosfat tuzlarının etkisiyle eşleştiği ve fosfat bantlarının (Spevak vd., 2013) (Luna-Zaragoza vd., 2009) gözlemlendiği belirlenmiştir. Adsorpsiyondan sonra, bu noktadaki pikin daha genişlediği gözlemlenmiştir. Adsorpsiyondan önce ve sonra 668 cm⁻¹'deki pikin yoğunluğunda herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

Taramalı elektron mikroskopu (SEM) sonuçlarına göre, DPF'nin yüzeyi pürüzsüzken (Şekil 7.2 (a)), boyar maddeyle (DPF-MG) adsorpsiyon sonrası, MG'nin yüzeye yapıştığı ve iç patlama görüntüsü oluşturduğu gözlemlenmiştir (Şekil 7.2 (b)). Pürüzlü ve dolu biyoçar yüzeyi (DPC) (Şekil 7.2 (c)), adsorpsiyondan sonra boyar maddenin (DPC-MG) neden olduğu gözenekli ve delikli bir yüzeye dönüşmüştür (Şekil 7.2 (d)). DPMW'nin yapısı lifli ve dağınık gözenekliken (Şekil 7.2 (e)), adsorpsiyondan önce ve sonra çok fazla değişiklik gözlemlenmemiş ve gözeneklerde herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir. DPMW-MG örneğinde görünür bir boya yapışması bulunmamaktadır (Şekil 7.2 (f)).



Şekil 7.2. DPF'nin (a), DPF-MG'nin (b), DPC'nin (c), DPC-MG'nin (d), DPMW'nin (e) ve DPMW-MG'nin (f) SEM mikrografik görüntüleri.



Şekil 7.3. DPF (a), DPC (c), DPMW'nin TGA eğrileri; adsorpsiyon öncesi ve sonrası DPF (b), DPC (d), DPMW'nin DTG eğrileri (e).

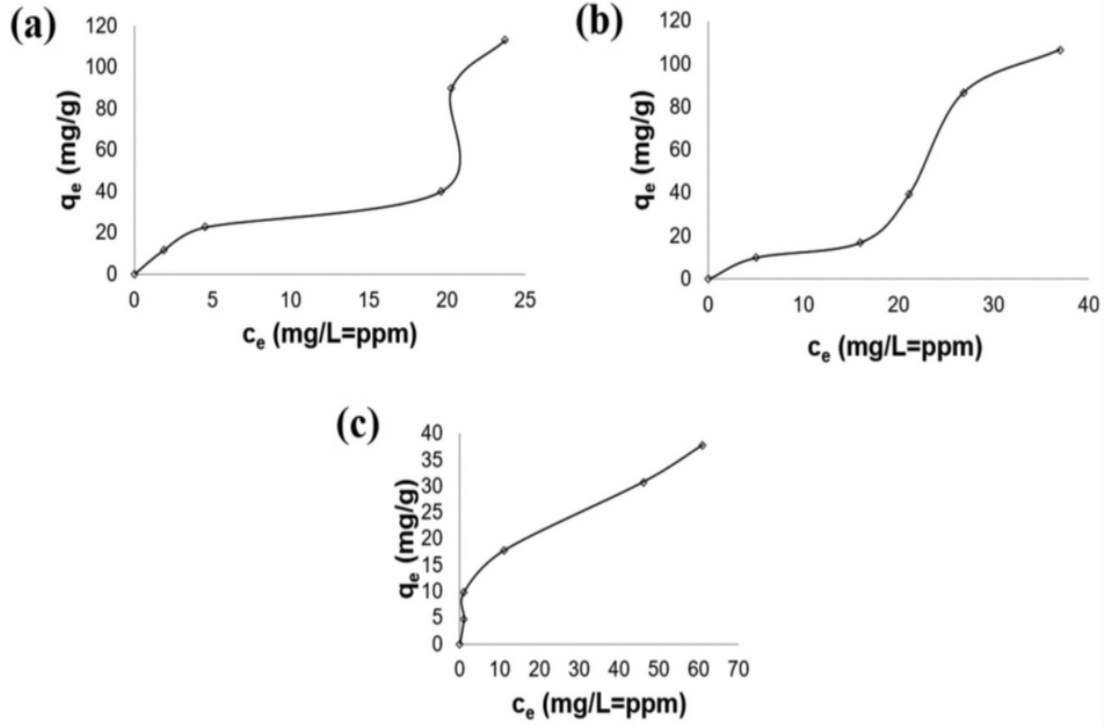
Şekil 7.3. DPF (a), DPC (c), DPMW'nin (e) TGA eğrileri; sırasıyla karşılık gelen DTG grafikleri (b), (d) ve (f) ile birlikte. Tüm üç adsorplayıcının TGA eğrileri incelendiğinde, 100°C civarındaki kütle kaybının yapısal olmayan serbest su kaybına bağlandığı gözlemlenmiştir (Ahmad vd., 2018). 300–400°C arasındaki kütle kaybı, selülozik ve hemiselülozik bileşiklerin parçalanmasından kaynaklanmıştır (Ahmad vd., 2018). Termal analiz açısından, DPF'nin adsorpsiyon öncesiyle karşılaştırıldığında adsorpsiyon sonrası termal direncinin önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Ancak, DPC ve DPMW için kütle% değerleri adsorpsiyon öncesi ve sonrası birbirine yakın olup, adsorpsiyon sonrası termal dayanıklılığın azaldığını göstermektedir.

DTG sonuçları, TGA sonuçlarıyla uyumludur. Özellikle, DPF için parçalanma sıcaklıkları daha yüksek sıcaklıklara kaymış, DPC için azalmış ve DPMW için parçalanma sıcaklığı neredeyse değişmemiştir.

7.2. ADSORPSİYON DENEYLERİ

7.2.1. İzoterm Şekli

Hem biyoçar hem de hurma ağacı L-tipi izoterm gösterirken (Şekil 7.4. (a,b)), fosfatlı kömür H-tipi bir izoterm gösterir (Şekil 7.4. (c)). L ve H tipi adsorpsiyonda, adsorplayıcı ve adsorplanan molekülleri arasında güçlü bir çekim kuvveti bulunurken, adsorplanan molekülleri arasındaki çekme kuvveti zayıftır (Giles, 1960). Adsorplanan ve adsorplayıcı arasındaki yüksek afinite, özel etkileşimler veya Van der Waals kuvvetleri aracılığıyla sağlanır (Giles, 1960). Ancak, H tipinde bazen yüzeydeki daha düşük afiniteye sahip tek iyonlar (örneğin, fonksiyonel kömürde fosfat) boyar iyonlarla (örneğin, klorür) değişim yaparak iyon-iyon çekimi oluşturur, bu da eğriyi dikey eksene doğru (y-ekseni) uzatır (Giles, 1960). Sonuç olarak, boyanın (DyS-NH_3^+) kromofor yapısı yapışmaz.



Şekil 7.4. DPF (a), DPC (b), DPMW (c) Giles izoterm tipleri.

7.2.2. Adsorpsiyon İzotermi

K_F adsorpsiyon kapasitesini temsil eder ve birimi mgg^{-1} 'dir. "n" parametresi adsorpsiyon yoğunluğuyla ilişkilidir ve işlem tipini belirler. Fosfatlı kömürün K_F değerinin hurma ağacı ve Biyoçarın K_F değerinden düşük olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 7.1.). Ayrıca, Tablo 7.1.'e göre, fosfatlı kömürün "n" değeri 1'e eşittir, oysa hurma ağacı ve biyoçar için "n" değeri 1'den küçük olarak hesaplanmıştır. Tüm üç adsorplayıcı için tercih edilen adsorpsiyon olduğu gözlemlenmiştir

Tablo 7.1. DPF-MG, DPC-MG ve DPMW-MG'nin izoterm verileri.

İzoterm	DPC	DPF	DPMW
Freundlich			
n	0.4	0.78	1
K_F	6.93	6.82	1.1
R^2	0.91	0.87	0.85
Langmuir			
q_{\max} (mg/g)	334	125	32
K_L (L/g)	6×10^{-3}	5×10^{-2}	2.6×10^{-1}
R^2	0.88	0.97	0.75
Temkin			
B (kJ/mol)	5×10^{-2}	7.2×10^{-2}	3.7×10^{-1}
R^2	0.91	0.94	0.93
$\ln K_T$	2.7	18.2	-19
H(kJ/mol)	-36	-115	247
R^2	0.94	0.97	0.95
Fowler-Frumkin-Guggenheim(FFG)			
W (kJ/mol)	4.87	3.42	-3.25
$\ln K_{FFG}$	-1.59	-1.23	-2.76
G (kJ/mol)	3.92	3.04	6.85
R^2	0.79	0.86	0.80
Dubinin-Radushkevich(D-R)			
q_{\max} (mg/g)	70	65	28
E (kJ/mol)	0.22	0.52	0.97
K_{D-R}	11.8	1.82	0.53
R^2	0.79	0.70	0.81
Flory-Huggins (F-H)			
n	-2.42	-2.07	-0.88
$\log K_{F-H}$	-3.79	-4.04	-2.95
G (kJ/mol)	22	23	17
R^2	0.84	0.61	0.81

MG'nin üç adsorplayıcı üzerindeki adsorpsiyon uyumluluğu Freundlich İzotermi (R^2) için hurma ağacı için %87, biyoçar için %91 ve fosfatlı kömür için %85'tir. Üç adsorbent arasında, Biyoçarın q_{\max} değerinin en yüksek olduğu 334 mg/g bulunmuştur. Biyoçarın q_{\max} değeri diğer adsorplayıcıların q_{\max} değerleriyle

karşılaştırıldığında, hurma ağacının q_{max} değerinin yaklaşık 2.7 kat daha yüksek olduğu ve fosfatlı kömürün q_{max} değerinin yaklaşık 10.44 kat daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. MG, üç adsorplayıcı içinde biyoçar için tercih edilirken, fosfatlı kömürün MG'nin adsorpsiyonu için uygun olmadığı düşünülmüştür.

Ayrıca, MG'nin üç adsorplayıcı üzerindeki adsorpsiyon uyumluluğu Langmuir İzotermi (R^2) için hurma ağacı için %97, biyoçar için %88 ve fosfatlı kömür için %75'tir. İlk denklemdeki B değeri 8 kJ/mol'den küçük olduğundan, MG'nin adsorplayıcılar üzerindeki adsorpsiyon tipinin fiziksel adsorpsiyon olduğu belirlenmiştir. İkinci denklemdeki Temkin'e göre, MG boyar maddesinin biyoçar ve hurma ağacı adsorplayıcıları üzerindeki adsorpsiyon ısısı eksotermik olarak hesaplanırken, fosfatlı kömürde endotermik olarak hesaplanmıştır.

Temkin'e göre uygunluk (R^2) birinci denklem için hurma ağacı için %94, biyoçar için %91 ve fosfatlı kömür için %93; ikinci denklem için uygunluk (R^2) sırasıyla %97, %94 ve %95 olarak bulunmuştur. Frumkin-Fowler-Guggenheim İzotermi (FFG) nde $W > 0$, adsorpsiyon ısısının eksotermik olduğunu, $W < 0$ olduğunda ise adsorpsiyon ısısının endotermik olduğunu gösterir. Çar ve hurma ağacında $W > 0$ olduğu gözlemlenirken, fosfatlı kömürde $W < 0$ olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerler, Temkin'in ikinci denkleminde hesaplanan adsorpsiyon ısısı değerleriyle uyumludur. MG'nin üç adsorplayıcı üzerindeki adsorpsiyon uyumluluğu (R^2) FFG'ye göre sırasıyla %86, %79 ve %80'dir.

Dubinin ve Radushkevich (D-R) adsorpsiyon izotermi sonuçlarına göre, hurma ağacı için maksimum doyma kapasitesi (q_{max}) 65 mg/g, biyoçar için 57 mg/g ve fosfatlı kömür için 28 mg/g'dir. Hesaplanan adsorpsiyon mekanizma enerjisi (E) adsorplayıcılar üzerindeki MG'nin 8 kJ/mol'den düşük olduğundan, bu Temkin'in birinci denklemdeki B değeri ile uyumludur.

Ayrıca, MG'nin üç adsorplayıcı üzerindeki D-R izotermiyle uyumluluğu (R^2) sırasıyla hurma ağacı için %70, biyoçar için %79 ve fosfatlı kömür için %81'dir. Flory-Huggins (F-H) izotermi için hesaplanan logKF-H değerleri her üç adsorplayıcı için negatiftir ve n değerleri 1'den küçüktür, bu da adsorplayıcıların (biyoçar, hurma

ağacı, fosfatlı kömür) birden fazla bölgesinin adsorbat tarafından işgal edildiğini önerir. Ayrıca, MG'nin üç adsorplayıcı üzerindeki adsorpsiyonunun kendiliğinden gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. MG'nin F-H izotermi (R^2) ile üç adsorplayıcı üzerindeki uyumu sırasıyla hurma ağacı için %61, biyoçar için %84 ve fosfatlı kömür için %81'dir. Langmuir izotermi modeli, adsorpsiyonun aktif sitelerinin etkileşimli olmadan homojen ve monokatman olduğunu göstermektedir. Ayrıca, DPF ve DPC'nin Giles izotermine göre L tipi olduğu ve Langmuir izoterme uyum sağladığı ve Langmuir izotermden hesaplanan yüksek q_{max} değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Özetle, özellikle DPF ve DPC için hesaplanan yüksek q_{max} değerleri dikkate alındığında, MG giderimi için kullanılan DPF ve DPC adsorplayıcılarının yüzeyinin homojen olduğu ve Langmuir izoterme en uygun şekilde uyduğu deneysel verilerle tutarlıdır. Bu sonuçlar, çeşitli biyoçarlar kullanan makalelerdeki verilerle uyumludur.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR

Bu çalışmada hurma ağacının MG adsorpsiyonu, piroliz sonucu elde edilen hurma ağacı biyokömürü ve fosfatlanmış fonksiyonel kömür adsorbanları 25°C'de değerlendirildi. Freundlich, Langmuir, Temkin, Fowler-Frumkin-Guggenheim (FFG), Dubinin-Radushkevich (D-R), Flory-Huggins (F-H) izotermi incelendi. Sonuç olarak; Freundlich izotermine göre, adsorpsiyonun üç adsorban için de tercih edilebilir olduğu bulundu. Ayrıca, Freundlich izotermine adsorpsiyon kapasitesinin bir göstergesi olan KF değeri hurma ağacı, biyokömür ve fosfatlanmış kömür için sırasıyla 6.82 mg/g, 6.93 mg/g ve 1.1 mg/g olarak hesaplandı.

Langmuir izotermine göre, q_{max} değerleri biyokömür (334 mg/g)>hurma ağacı (125 mg/g)>fosfatlanmış kömür (32 mg/g) olarak hesaplandı. D-R'da hesaplanan q_{max} değerleri biyokömür (70 mg/g)>hurma ağacı (65 mg/g)> fosfatlanmış kömür (28 mg/g) olarak bulundu. Bu sonuçlar, iki izoterm q_{max} sıralamasının uyumlu olduğunu gösterdi.

Temkin izotermine göre, üç adsorbandaki B değerinin 8 kJ/mol'den az olduğu ve fiziksel adsorpsiyon olduğu gözlemlendi. Ayrıca, bu sonuçların D-R'daki adsorpsiyon mekanizması enerji sonuçları ile uyumlu olduğu bulundu. Temkin izotermine göre hesaplanan adsorpsiyon ısı değerlerinin FFG izoterminden hesaplanan adsorpsiyon ısı değerleri ile uyumlu olduğu görüldü.

Char ve hurma ağacında FFG'de $W > 0$ olduğu için ekzotermik hale gelir, boya molekülleri birbirini çeker, çözücü moleküllerin char ve hurma ağacı taneleri arasına girmesini engeller ve boya molekülleri doğrudan adsorbana yönlendirilir. Öte yandan, fosfatlanmış kömürde $W < 0$ olduğu için endotermiktir. Boya molekülleri

birbirini iter. İtme sonucu çözücüler olan su molekülleri boya moleküllerini sarar ve adsorban yüzeyine ilk olarak yapışır. Bu nedenle, MG fonksiyonel kömür yeterince tutunamaz.

Adsorpsiyon öncesi ve sonrası FTIR/ATR sonuçları ve SEM görüntülerinin uyumlu olduğu ve izotermelerden hesaplanan verilerle desteklendiği görüldü.

karşılaştırıldığında, izoterm sonuçları tüm üç adsorban için adsorpsiyon dengeleme süresinin daha kısa olduğunu ve bu nedenle malahit yeşilinin atık sudan kısa sürede uzaklaştırılmasının mümkün olduğunu göstermektedir. Ayrıca, diğer çalışmalarda pH ayarı ile elde edilen etkili sonuçlarla karşılaştırıldığında, bu çalışmada boyanın doğal pH değerinde benzer sonuçlar elde edilmesi, kullandığımız adsorbanların adsorpsiyon çalışması için uygun olduğunu göstermektedir. Gelecekteki çalışmalarda, biyokömürlerin yüzey modifikasyonlarının geliştirilmesiyle daha yüksek maksimum adsorpsiyon kapasitesi değerlerine ulaşılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

Abbas, Z., Ali, S., Rizwan, M., Zaheer, I. E., Malik, A., Riaz, M. A., Shahid, M. R., Rehman, M. Z. ur, & Al-Wabel, M. I. (2018). A critical review of mechanisms involved in the adsorption of organic and inorganic contaminants through bioçar. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(16). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3790-1>

Abbood, N. S., Ali, N. S., Khader, E. H., Majdi, H. S., Albayati, T. M., & Saady, N. M. C. (2023). Photocatalytic degradation of cefotaxime pharmaceutical compounds onto a modified nanocatalyst. *Research on Chemical Intermediates*, 49(1), 43–56. <https://doi.org/10.1007/s11164-022-04879-3>

Afiq MJA, Rahman RA, Man YBC, Al-Kahtani HA, Mansor TST (2013) Date seed and date seed oil. *Int Food Res J* 20(5):2035

Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Bioçar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. In *Chemosphere* (Vol. 99, pp. 19–33). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>

Ahmad, T., Danish, M., Rafatullah, M., Ghazali, A., Sulaiman, O., Hashim, R., & Ibrahim, M. N. M. (2012). The use of date palm as a potential adsorbent for wastewater treatment: A review. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 19, Issue 5, pp. 1464–1484). <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0709-8>

Akar, E., Altinişik, A., & Seki, Y. (2013). Using of activated carbon produced from spent tea leaves for the removal of malachite green from aqueous solution. *Ecological Engineering*, 52, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.032>

Akdemir, M., Isik, B., Cakar, F., & Cankurtaran, O. (2022). Comparison of the adsorption efficiency of cationic (Crystal Violet) and anionic (Congo Red) dyes on *Valeriana officinalis* roots: Isotherms, kinetics, thermodynamic studies, and error functions. *Materials Chemistry and Physics*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126763>

Akdut, G. (2015). Figure 3.3. In *Yeni Bir Polimer Adsorplayıcı Üzerinde Tehlikeli Organik Atıkların Adsorpsiyonu* [Unpublished master's thesis]. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.

Akhil, D., Lakshmi, D., Kartik, A., Vo, D. V. N., Arun, J., & Gopinath, K. P. (2021). Production, characterization, activation and environmental applications of engineered bioçar: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 19, Issue 3, pp. 2261–2297). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01167-7>

Al-Alawi, R., Al-Mashiqri, J. H., Al-Nadabi, J. S. M., Al-Shihi, B. I., & Baqi, Y. (2017). Date palm tree (*Phoenix dactylifera* L.): Natural products and therapeutic options. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00845>

Alaqarbeh, M., Al, P., & Abdullah, H. Bin. (2021). Adsorption Phenomena: Definition, Mechanisms, and Adsorption Types: Short Review. *RHAZES: Green and Applied Chemistry*, 13, 43–51. <https://doi.org/10.48419/IMIST.PRSM/rhazes-v13.28283>

Ali, I., & Gupta, V. K. (2007). Advances in water treatment by adsorption technology. *Nature Protocols*, 1(6), 2661–2667. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.370>

Ali, N. S., Alismaeel, Z. T., Majdi, H. S., Salih, H. G., Abdulrahman, M. A., Cata Saady, N. M., & Albayati, T. M. (2022). Modification of SBA-15 mesoporous silica as an active heterogeneous catalyst for the hydroisomerization and hydrocracking of n-heptane. *Heliyon*, 8(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09737>

Ali, N. S., Harharah, H. N., Salih, I. K., Cata Saady, N. M., Zendejboudi, S., & Albayati, T. M. (2023). Applying MCM-48 mesoporous material, equilibrium, isotherm, and mechanism for the effective adsorption of 4-nitroaniline from wastewater. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37090-4>

Ali, N. S., Kalash, K. R., Ahmed, A. N., & Albayati, T. M. (2022). Performance of a solar photocatalysis reactor as pretreatment for wastewater via UV, UV/TiO₂, and UV/H₂O₂ to control membrane fouling. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20984-0>

Al-Jaaf, H. J., Ali, N. S., Alardhi, S. M., & Albayati, T. M. (2022). Implementing eggplant peels as an efficient bio-adsorbent for treatment of oily domestic wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 245, 226–237. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.27986>

Al-Khodor, Y. A. A., & Albayati, T. M. (2023). Real heavy crude oil desulfurization onto nanoporous activated carbon implementing batch adsorption process: equilibrium, kinetics, and thermodynamic studies. *Chemistry Africa*, 6(2), 747–756. <https://doi.org/10.1007/s42250-022-00482-6>

Aller, M. F. (2016). Biochar properties: Transport, fate, and impact. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(14–15), 1183–1296. <https://doi.org/10.1080/10643389.2016.1212368>

Almarri, A. H. (2023). Chitosan composites for thionine dye adsorption. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103(14), 3212–3223. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1904915>

Altıntig, E., Onaran, M., Sarı, A., Altundag, H., & Tuzen, M. (2018). Preparation, characterization and evaluation of bio-based magnetic activated carbon for effective adsorption of malachite green from aqueous solution. *Materials Chemistry and Physics*, 220, 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.05.077>

Ania, C. O., Parra, J. B., Menéndez, J. A., & Pis, J. J. (2005). Effect of microwave and conventional regeneration on the microporous and mesoporous network and on the adsorptive capacity of activated carbons. *Microporous and Mesoporous Materials*, 85(1–2), 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.06.013>

Aziz, S., Uzair, B., Ali, M. I., Anbreen, S., Umber, F., Khalid, M., Aljabali, A. A., Mishra, Y., Mishra, V., Serrano-Aroca, Á., Naikoo, G. A., El-Tanani, M., Haque, S., Almutary, A. G., & Tambuwala, M. M. (2023). Synthesis and characterization of nanobiochar from rice husk biochar for the removal of safranin and malachite green from water. *Environmental Research*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116909>

Babu, B. V. (2008). Biomass pyrolysis: A state-of-the-art review. In *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* (Vol. 2, Issue 5, pp. 393–414). <https://doi.org/10.1002/bbb.92>

Barría, Y., Burbano, A., James, A., Gascó, G., & Méndez, A. (2023). Sorption capacity of biochars obtained by gasification of rice husks and wild sugarcane: removal of malachite green and arsenic from water solutions. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04325-3>

Badawi (2019) Production of biochar from date palm fronds and its effects on soil properties by-products of palm trees and their applications. *By-Prod. Palm Trees Appl* 11:159

Bartoli, M., Giorcelli, M., Jagdale, P., Rovere, M., & Tagliaferro, A. (2020). A review of non-soil biochar applications. In *Materials* (Vol. 13, Issue 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma13020261>

Bassyouni M, Hasan SW, Abdel-Aziz MH, Abdel-hamid SS, Naveed S (2014) Date palm waste gasification in downdraft gasifier and simulation using ASPEN HYSYS. *Energy Convers Manage* 88:693–699

Bayram, O., Moral, E., Köksal, E., Göde, F., & Pehlivan, E. (2023). Removal of methyl blue and malachite green from water using biodegradable magnetic *Tamarindus Indica* fruit seed biochar: Characterization, equilibrium study, modelling and thermodynamics. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100023>

Besbes S, Blecker C, Deroanne C, Drira NE, Attia H (2004) Date seeds: chemical composition and characteristic profiles of the lipid fraction. *Food Chem* 84(4):577–584. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00281-4](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00281-4)

Bhagavathi Pushpa, T., Vijayaraghavan, J., Sardhar Basha, S. J., Sekaran, V., Vijayaraghavan, K., & Jegan, J. (2015a). Investigation on removal of malachite green using EM based compost as adsorbent. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 118, 177–182. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.04.033>

Bhagavathi Pushpa, T., Vijayaraghavan, J., Sardhar Basha, S. J., Sekaran, V., Vijayaraghavan, K., & Jegan, J. (2015b). Investigation on removal of malachite green using EM based compost as adsorbent. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 118, 177–182. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.04.033>

Braghiroli, F. L., Bouafif, H., Neculita, C. M., & Koubaa, A. (2018). Activated Bioçar as an Effective Sorbent for Organic and Inorganic Contaminants in Water. *Water, Air, and Soil Pollution*, 229(7). <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3889-8>

Brassard, P., Godbout, S., Lévesque, V., Palacios, J. H., Raghavan, V., Ahmed, A., Hogue, R., Jeanne, T., & Verma, M. (2019). Bioçar for soil amendment. In *Çar and Carbon Materials Derived from Biomass: Production, Çaracterization and Applications* (pp. 109–146). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814893-8.00004-3>

Burezq, H., & Davidson, M. K. (2023). Bioçar from date palm (*Phoenix dactylifera* L.) residues—a critical review. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(2). <https://doi.org/10.1007/s12517-022-11123-0>

Cai, Y., Karmakar, B., Salem, M. A., Alzahrani, A. Y., Bani-Fwaz, M. Z., Oyouni, A. A. A., Al-Amer, O., & Batiha, G. E. S. (2022). Ag NPs supported chitosan-agarose modified Fe₃O₄ nanocomposite catalyzed synthesis of indazolo[2,1-b]phthalazines and anticancer studies against liver and lung cancer cells. *International Journal of Biological Macromolecules*, 208, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.02.172>

Cha, J. S., Park, S. H., Jung, S. C., Ryu, C., Jeon, J. K., Shin, M. C., & Park, Y. K. (2016). Production and utilization of bioçar: A review. In *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (Vol. 40, pp. 1–15). Korean Society of Industrial Engineering Chemistry. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>

Chao, C. T., & Krueger, R. R. (2007). The date palm (*Phoenix dactylifera* L.): overview of biology, uses, and cultivation. *HortScience*, 42(5), 1077–1082.

Chen, J., Karmakar, B., Salem, M. A., Alzahrani, A. Y., Bani-Fwaz, M. Z., Abdel-Daim, M. M., & El-kott, A. F. (2022). CuO NPs@Starch as a novel chemotherapeutic drug for the treatment of several types of gastrointestinal system cancers including gastric, pancreatic, and colon cancers. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(4). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103681>

Chen, W., Meng, J., Han, X., Lan, Y., & Zhang, W. (2019). Past, present, and future of bioçar. In *Bioçar* (Vol. 1, Issue 1, pp. 75–87). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s42773-019-00008-3>

Cheriaa, J., Khaireddine, M., Rouabhia, M., & Bakhrouf, A. (2012). Removal of triphenylmethane dyes by bacterial consortium. *The Scientific World Journal*, 2012.

Choudhary, M., Kumar, R., & Neogi, S. (2020). Activated bioçar derived from *Opuntia ficus-indica* for the efficient adsorption of malahite green dye, Cu⁺² and Ni⁺² from water. *Journal of Hazardous Materials*, 392. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122441>

Cotoruelo, L. M., Marqués, M. D., Leiva, A., Rodríguez-Mirasol, J., & Cordero, T. (2011). Adsorption of oxygen-containing aromatics used in petrochemical, pharmaceutical and food industries by means of lignin based active carbons. *Adsorption*, 17(3), 539–550. <https://doi.org/10.1007/s10450-010-9319-x>

Dąbrowski, A. (2001). Adsorption—from theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science*, 93(1–3), 135–224.

Dai, L., Zhu, W., He, L., Tan, F., Zhu, N., Zhou, Q., He, M., & Hu, G. (2018). Calcium-rich bioçar from crab shell: An unexpected super adsorbent for dye removal. *Bioresource Technology*, 267, 510–516. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.090>

Daneshvar, N., Ayazloo, M., Khataee, A. R., & Pourhassan, M. (2007). Biological decolorization of dye solution containing Malahite Green by microalgae *Cosmarium* sp. *Bioresource Technology*, 98(6), 1176–1182. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.05.025>

Das, R., Mukherjee, A., Sinha, I., Roy, K., & Dutta, B. K. (2020). Synthesis of potential bio-adsorbent from Indian Neem leaves (*Azadirachta indica*) and its optimization for malahite green dye removal from industrial wastes using response surface methodology: kinetics, isotherms and thermodynamic studies. *Applied Water Science*, 10(5). <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01184-5>

Demirbaş, A., & Arin, G. (2002). An overview of biomass pyrolysis. *Energy Sources*, 24(5), 471–482. <https://doi.org/10.1080/00908310252889979>

Deng, H., Li, Y. F., Tao, S. Q., Li, A. Y., Li, Q. Y., & Hu, L. N. (2022). Efficient adsorption capability of banana and cassava bioçar for malahite green: Removal process and mechanism exploration. *Environmental Engineering Research*, 27(3). <https://doi.org/10.4491/eer.2020.575>

Deniz, F., & Kepekci, R. A. (2017). Bioremoval of Malahite green from water sample by forestry waste mixture as potential biosorbent. *Microchemical Journal*, 132, 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.01.015>

Dokuz Eylül University. (2017). Figure 3.4 from Surface Chemistry Course Material [PDF document]. Retrieved from <https://mme.deu.edu.tr/wpcontent/uploads/2017/07/YuZEYKiMYASIDERS.pdf>

Duran, H., Sismanoglu, S., & Sismanoglu, T. (2019). Binary biomaterials (inorganic material/natural resin): synthesis, characterization and performance for adsorption of dyes. *J Ind Chem Soc*, 96, 1245–1251.

Ebner, A. D., & Ritter, J. A. (2009). State-of-the-art adsorption and membrane separation processes for carbon dioxide production from carbon dioxide emitting industries. In *Separation Science and Technology* (Vol. 44, Issue 6, pp. 1273–1421). <https://doi.org/10.1080/01496390902733314>

Eltaweil, A. S., Ali Mohamed, H., Abd El-Monaem, E. M., & El-Subruiti, G. M. (2020). Mesoporous magnetic biochar composite for enhanced adsorption of malachite green dye: Characterization, adsorption kinetics, thermodynamics and isotherms. *Advanced Powder Technology*, 31(3), 1253–1263. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.01.005>

Evan ANM, Vasiliki K, Hanene A, Ahmed A, Çaralampos D, Salah J, Carlos, Paula S, Evangelos T, Leila E, Camélia M, Mejdí J (2020) *Sustainability* 12: 6081:1–15

Fahmy, T. Y. A., Fahmy, Y., Mobarak, F., El-Sakhawy, M., & Abou-Zeid, R. E. (2020). Biomass pyrolysis: past, present, and future. In *Environment, Development and Sustainability* (Vol. 22, Issue 1, pp. 17–32). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0200-5>

Fang, C., Schmidt, J. E., Cybulska, I., Brudecki, G. P., Frankær, C. G., & Thomsen, M. H. (2015). Hydrothermal pretreatment of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) leaflets and rachis to enhance enzymatic digestibility and bioethanol potential. *BioMed Research International*, 2015.

Fiala, H., Bendjeffal, H., Achraf, H., Amina, L., Yamina, B., Zhour, H., & Abdelhak, G. (2021). Removal of Malachite Green Dye From Aqueous Media using *Helianthus Annuus* Seeds Shells as Eco-Friendly Adsorbent: Optimization, Equilibrium, and Kinetic Studies (Vol. 25). <http://annalsofrscb.ro>

Fu, L., Li, J., Wang, G., Luan, Y., & Dai, W. (2021). Adsorption behavior of organic pollutants on microplastics. In *Ecotoxicology and Environmental Safety* (Vol. 217). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112207>

Ganguly, P., Sarkhel, R., & Das, P. (2020). Synthesis of pyrolyzed biochar and its application for dye removal: Batch, kinetic and isotherm with linear and non-linear mathematical analysis. *Surfaces and Interfaces*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100616>

Gawande, S. M., Belwalkar, N. S., & Mane, A. A. (2017). Adsorption and its Isotherm – Theory. *International Journal of Engineering Research*, 6(6), 312. <https://doi.org/10.5958/2319-6890.2017.00026.5>

Ghasemi, M., Mashhadi, S., Asif, M., Tyagi, I., Agarwal, S., & Gupta, V. K. (2016). Microwave-assisted synthesis of tetraethylenepentamine functionalized activated

carbon with high adsorption capacity for Malahite green dye. *Journal of Molecular Liquids*, 213, 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.09.048>

Giri, B. S., Sonwani, R. K., Varjani, S., Chaurasia, D., Varadavenkatesan, T., Chaturvedi, P., Yadav, S., Katiyar, V., Singh, R. S., & Pandey, A. (2022). Highly efficient bio-adsorption of Malahite green using Chinese Fan-Palm Bioçar (*Livistona chinensis*). *Chemosphere*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132282>

Goswami, L., Kushwaha, A., Kafle, S. R., & Kim, B. S. (2022). Surface Modification of Bioçar for Dye Removal from Wastewater. In *Catalysts* (Vol. 12, Issue 8). MDPI. <https://doi.org/10.3390/catal12080817>

Gupta, S., Kua, H. W., & Low, C. Y. (2018). Use of bioçar as carbon sequestering additive in cement mortar. *Cement and Concrete Composites*, 87, 110–129. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.009>

Gümüş, F. (2022). Utilization of Algal Waste Biomass-Derived Bioçar Prepared by a Microwave-Assisted Method for Aniline Green Adsorption. *Water, Air, and Soil Pollution*, 233(9). <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05833-0>

Hameed, B. H., & El-Khaiary, M. I. (2008). Kinetics and equilibrium studies of malahite green adsorption on rice straw-derived çar. *Journal of Hazardous Materials*, 153(1–2), 701–708. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.019>

Hammud, H. H., Hammoud, M. H., Hussein, A. A., Fawaz, Y. B., Abdul Hamid, M. H. S., & Sheikh, N. S. (2023). Removal of Malahite Green Using Hydroçar from PALM Leaves. *Sustainability* (Switzerland), 15(11). <https://doi.org/10.3390/su15118939>

Hemmati, F., Norouzbeigi, R., Sarbisheh, F., & Shayesteh, H. (2016). Malahite green removal using modified sphagnum peat moss as a low-cost biosorbent: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 58, 482–489. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.07.004>

Hidayah, N., Bakar, A., Mahyudin, N. A., Faridah, S., Azura, N., & Zaman, M. Z. (2013). Detection of malahite green and leuco-malahite green in fishery industry. In *International Food Research Journal* (Vol. 20, Issue 4).

Huang, Y. F., Chiueh, P. Te, Kuan, W. H., & Lo, S. L. (2016). Microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass: Heating performance and reaction kinetics. *Energy*, 100, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.088>

Ince, M., & Ince, O. K. (2022). Wastewater treatment. *BoD–Books on Demand*.

Ishtiaq, F., Bhatti, H. N., Khan, A., Iqbal, M., & Kausar, A. (2020). Polypyrole, polyaniline and sodium alginate biocomposites and adsorption-desorption efficiency for imidacloprid insecticide. *International Journal of Biological Macromolecules*, 147, 217–232. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.022>

Jabar, J. M., & Odusote, Y. A. (2024). Utilization of prepared activated biochar from water lily (*Nymphaea lotus*) stem for adsorption of malachite green dye from aqueous solution. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(5), 5999–6010.

Jabar, J. M., Odusote, Y. A., Ayinde, Y. T., & Yılmaz, M. (2022). African almond (*Terminalia catappa* L) leaves biochar prepared through pyrolysis using H₃PO₄ as chemical activator for sequestration of methylene blue dye. *Results in Engineering*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100385>

Jabbar, N. M., Alardhi, S. M., Mohammed, A. K., Salih, I. K., & Albayati, T. M. (2022). Challenges in the implementation of bioremediation processes in petroleum-contaminated soils: A review. In *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management* (Vol. 18). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100694>

Jiwan, S., & Ajay, K. (2011). Effects of Heavy Metals on Soil, Plants, Human Health and Aquatic Life. *International Journal of Research in Chemistry and Environment*, 1, 15–21. www.ijrce.org

Jørgensen, S. E. (1989). Adsorption and ion exchange. In *Developments in environmental modelling* (Vol. 14, pp. 65–81). Elsevier.

Kabita Sharma. (2022). Figure 3.2. [Online Image]. Retrieved from <https://scienceinfo.com/adsorption-its-types-and-applications/>

Kadhum, S. T., Alkindi, G. Y., & Albayati, T. M. (2021). Determination of chemical oxygen demand for phenolic compounds from oil refinery wastewater implementing different methods. *Desalination and Water Treatment*, 231, 44–53. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27443>

Kamel, M. M., El-Sayed, M. Y., Alsohaimi, I. H., Al-Furhud, S. F., Hassan, H. M. A., & Aldawsari, A. M. (2023). Applicability of mesoporous carbon-glassy polyvinyl alcohol/silica gel hybrid composite to remove methylene blue from aqueous solution. *Research on Chemical Intermediates*, 49(8), 3659–3679. <https://doi.org/10.1007/s11164-023-05041-3>

Kan, T., Strezov, V., & Evans, T. J. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 57, pp. 1126–1140). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>

Kant Bhatia, S., Palai, A. K., Kumar, A., Kant Bhatia, R., Kumar Patel, A., Kumar Thakur, V., & Yang, Y. H. (2021). Trends in renewable energy production employing biomass-based biochar. In *Bioresource Technology* (Vol. 340). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125644>

Karadeniz, S. C., Isik, B., Ugraskan, V., & Cakar, F. (2023). Agricultural *Lolium perenne* seeds as a low-cost biosorbent for Safranin T adsorption from wastewater: Isotherm, kinetic, and thermodynamic studies. *Physics and Chemistry of the Earth*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103338>

Khadim, A. T., Albayati, T. M., & Cata Saady, N. M. (2022). Removal of sulfur compounds from real diesel fuel employing the encapsulated mesoporous material adsorbent Co/MCM-41 in a fixed-bed column. *Microporous and Mesoporous Materials*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2022.112020>

Khalid, Q. ul ain, Khan, A., Bhatti, H. N., Sadaf, S., Kausar, A., Alissa, S. A., Alghaith, M. K., & Iqbal, M. (2021). Cellulosic biomass biocomposites with polyaniline, polypyrrole and sodium alginate: Insecticide adsorption-desorption, equilibrium and kinetics studies. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(7). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103227>

Khan, A. L., Al-Harrasi, A., Numan, M., Abdulkareem, N. M., Mabood, F., & Al-Rawahi, A. (2021). Spectroscopic and molecular methods to differentiate gender in immature date palm (*Phoenix dactylifera* L.). *Plants*, 10(3), 1–15. <https://doi.org/10.3390/plants10030536>

Khan, A., Nawaz Bhatti, H., Tahira, M., Othman Alqahtani, F., Al-Fawzan, F. F., Alissa, S. A., & Iqbal, M. (2023). Na-alginate, polyaniline and polypyrrole composites with cellulosic biomass for the adsorptive removal of herbicide: Kinetics, equilibrium and thermodynamic studies. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(1). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104399>

Kireç, O., Alacabey, İ., Erol, K., & Alkan, H. (2021). Removal of 17 β -estradiol from aqueous systems with hydrophobic microspheres. *Journal of Polymer Engineering*, 41(3), 226–234.

Králik, M. (2014). Adsorption, chemisorption, and catalysis. In *Chemical Papers* (Vol. 68, Issue 12, pp. 1625–1638). De Gruyter Open Ltd. <https://doi.org/10.2478/s11696-014-0624-9>

Krieger-Brockett, B. (1994). MICROWAVE PYROLYSIS OF BIOMASS. In *Res. Chem. Intermed* (Vol. 20, Issue I).

Lam, S. S., & Chase, H. A. (2012). A review on waste to energy processes using microwave pyrolysis. In *Energies* (Vol. 5, Issue 10, pp. 4209–4232). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en5104209>

Lee, H. W., Kim, Y. M., Kim, S., Ryu, C., Park, S. H., & Park, Y. K. (2018). Review of the use of activated biochar for energy and environmental applications. In *Carbon Letters* (Vol. 26, Issue 1, pp. 1–10). Korean Carbon Society. <https://doi.org/10.5714/CL.2018.26.001>

Le-Minh, N., Sivret, E. C., Shammay, A., & Stuetz, R. M. (2018). Factors affecting the adsorption of gaseous environmental odors by activated carbon: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 48(4), 341–375. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1460984>

Lemos, E. S., Fiorentini, E. F., Bonilla-Petriciolet, A., & Escudero, L. B. (2023). Malahite Green Removal by Grape Stalks Biosorption from Natural Waters and Effluents. *Adsorption Science and Technology*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/6695937>

Leng, L., Xiong, Q., Yang, L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Jiang, S., Li, H., & Huang, H. (2021). An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. In *Science of the Total Environment* (Vol. 763). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144204>

Leng, L., Yuan, X., Zeng, G., Shao, J., Chen, X., Wu, Z., Wang, H., & Peng, X. (2015). Surface characterization of rice husk bio-char produced by liquefaction and application for cationic dye (Malahite green) adsorption. *Fuel*, 155, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.019>

LeVan, M. D., Carta, G., & Yon, C. M. (1997). Adsorption and ion exchange. *Energy*, 16, 17.

Li BeiBei, L. B., Gan Li, G. L., Owens, G., & Chen ZuLiang, C. Z. (2018). New nano-biomaterials for the removal of malahite green from aqueous solution via a response surface methodology.

Li, J. R., Kuppler, R. J., & Zhou, H. C. (2009). Selective gas adsorption and separation in metal-organic frameworks. *Chemical Society Reviews*, 38(5), 1477–1504. <https://doi.org/10.1039/b802426j>

Li, J., Dai, J., Liu, G., Zhang, H., Gao, Z., Fu, J., He, Y., & Huang, Y. (2016). Biochar from microwave pyrolysis of biomass: A review. In *Biomass and Bioenergy* (Vol. 94, pp. 228–244). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.09.010>

Li, J., Su, J., Yang, Q., & Yang, Z. (2023). Hydrothermal synthesis of Zr-doped chitosan carbon-shell protected magnetic composites (Zr-Fe₃O₄@C) for stable removal of Cr(VI) from water: Enhanced adsorption and pH adaptability. *Materials Chemistry and Physics*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128057>

Li, M., Mu, J., Liu, Y., Wang, H., Wang, Y., & Song, H. (2023). Removal of phenol by lignin-based activated carbon as an efficient adsorbent for adsorption of phenolic wastewater. *Research on Chemical Intermediates*, 49(5), 2209–2232. <https://doi.org/10.1007/s11164-023-04958-z>

Li, N., Li, G., Li, R., Karmakar, B., El-kott, A. F., Bani-Fwaz, M. Z., Negm, S., & Morsy, K. (2022). Synthesis of Au NPs/Quince nanoparticles mediated by Quince extract for the treatment of human cervical cancer: Introducing a novel chemotherapeutic supplement. *Materials Express*, 12(12), 1465–1473.

Li, Y. M., Wang, L. W., Li, R. P., Han, J. H., & Huang, M. J. (2018). Facile method for detecting C₂₃H₂₅ClN₂ in fish using Au nanoparticle films as SERS substrates on glass. *Micro and Nano Letters*, 13(6), 868–871. <https://doi.org/10.1049/mnl.2017.0911>

Li, Y., Xing, B., Ding, Y., Han, X., & Wang, S. (2020). A critical review of the production and advanced utilization of biochar via selective pyrolysis of lignocellulosic biomass. In *Bioresource Technology* (Vol. 312). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123614>

Lichtenberg, J. Y., Ling, Y., & Kim, S. (2019). Non-specific adsorption reduction methods in biosensing. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 19, Issue 11). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s19112488>

Lima, D. R., Klein, L., & Dotto, G. L. (2017). Application of ultrasound modified corn straw as adsorbent for malachite green removal from synthetic and real effluents. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(26), 21484–21495. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9802-y>

Liu, Q. S., Zheng, T., Wang, P., & Guo, L. (2010a). Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by microwave-induced phosphoric acid activation. *Industrial Crops and Products*, 31(2), 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.10.011>

Liu, Q. S., Zheng, T., Wang, P., & Guo, L. (2010b). Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by microwave-induced phosphoric acid activation. *Industrial Crops and Products*, 31(2), 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.10.011>

Liu, W. J., Jiang, H., & Yu, H. Q. (2019). Emerging applications of biochar-based materials for energy storage and conversion. In *Energy and Environmental Science* (Vol. 12, Issue 6, pp. 1751–1779). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c9ee00206e>

Lu, W., Yuan, D., Zhao, D., Schilling, C. I., Plietzsch, O., Muller, T., Bräse, S., Guenther, J., Blümel, J., Krishna, R., Li, Z., & Zhou, H. C. (2010). Porous polymer networks: Synthesis, porosity, and applications in gas storage/separation. *Chemistry of Materials*, 22(21), 5964–5972. <https://doi.org/10.1021/cm1021068>

Luo, J., Sun, S., Chen, X., Lin, J., Ma, R., Zhang, R., & Fang, L. (2021). In-depth exploration of the energy utilization and pyrolysis mechanism of advanced continuous microwave pyrolysis. *Applied Energy*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116941>

Luo, J., Yu, D., Hristovski, K. D., Fu, K., Shen, Y., Westerhoff, P., & Crittenden, J. C. (2021). Critical Review of Advances in Engineering Nanomaterial Adsorbents for Metal Removal and Recovery from Water: Mechanism Identification and Engineering Design. In *Environmental Science and Technology* (Vol. 55, Issue 8, pp. 4287–4304). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07936>

Malhotra, A., Srivastava, S., Manjhu, S., Lokhande, R. S., Sahu, R., Jain, S. K., Sharma, K. B., & Tripathi, B. (2022). Study of adsorbent characteristics of palm

leaves powder as a bio sorbent for removal of malachite green (MG) dye. *Materials Today: Proceedings*, 67, 900–904. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.347>

Malkoc, E., & Nuhoglu, Y. (2007). Determination of kinetic and equilibrium parameters of the batch adsorption of Cr(VI) onto waste acorn of *Quercus ithaburensis*. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(10), 1020–1029. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.05.007>

Mašek, O. (2013). Biochar and carbon sequestration. *Fire Phenomena and the Earth System: An Interdisciplinary Guide to Fire Science*, 309–322.

Menendez, J. A., Menendez, E. M., Iglesias, M. J., Garcia, A., & Pis'instituto, J. J. (1999). Modification of the surface chemistry of active carbons by means of microwave-induced treatments. In *Carbon* (Vol. 37).

Meng, J., Hu, Z., Liang, J., Duan, X., Wang, Y., Srinivasakannan, C., Wei, X., & Yang, Z. (2023). Synthesis of surface modified ceramsite from waste material and its application for phosphate removal from aqueous solutions. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1–18.

Mhemeed, A. H. (2018). A general overview on the adsorption. *Indian Journal of Natural Sciences*, 9(51), 16127–16131.

Mohammad-Khah, A., & Ansari, R. (2009). Activated charcoal: preparation, characterization and applications: a review article. *Int J Chem Tech Res*, 1(4), 859–864.

Mokhtar, N. M., Omar, R., & Idris, A. (2012). Microwave pyrolysis for conversion of materials to energy: A brief review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 34(22), 2104–2122. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.493923>

Moreira, M. T., Noya, I., & Feijoo, G. (2017). The prospective use of biochar as adsorption matrix – A review from a lifecycle perspective. In *Bioresource Technology* (Vol. 246, pp. 135–141). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.041>

Mosebolatan Jabar, J., & Odusote, Y. A. (2024). Utilization of prepared activated biochar from water lily (*Nymphaea lotus*) stem for adsorption of malachite green dye from aqueous solution. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01399-9/Published>

Motasemi, F., & Afzal, M. T. (2013). A review on the microwave-assisted pyrolysis technique. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 28, pp. 317–330). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.008>

Mukome, F. N. D., Zhang, X., Silva, L. C. R., Six, J., & Parikh, S. J. (2013). Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(9), 2196–2204. <https://doi.org/10.1021/jf304914z>

Muñoz, C., Góngora, S., & Zagal, E. (2016). USE OF BIOÇAR AS A SOIL AMENDMENT: A BRIEF REVIEW USO DEL BIOCARBÓN COMO ENMENDADOR DE SUELOS: UNA BREVE REVISIÓN. *Chilean J. Agric. Anim. Sci., Ex Agro-Ciencia*, 32. www.bioçar-international.org/publi-

Nachenius, R. W., Ronsse, F., Venderbosch, R. H., & Prins, W. (2013). Biomass Pyrolysis. In *Advances in Chemical Engineering* (Vol. 42, pp. 75–139). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386505-2.00002-X>

Namazi, A. B., Allen, D. G., & Jia, C. Q. (2016). Benefits of microwave heating method in production of activated carbon. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 94(7), 1262–1268. <https://doi.org/10.1002/cjce.22521>

Naseeruteen, F., Hamid, N. S. A., Suah, F. B. M., Ngah, W. S. W., & Mehamod, F. S. (2018). Adsorption of malahite green from aqueous solution by using novel chitosan ionic liquid beads. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107(PartA), 1270–1277. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.09.111>

Ng, H. W., Lee, L. Y., Chan, W. L., Gan, S., & Chemmangattuvalappil, N. (2016). Luffa acutangula peel as an effective natural biosorbent for malahite green removal in aqueous media: equilibrium, kinetic and thermodynamic investigations. *Desalination and Water Treatment*, 57(16), 7302–7311. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1016460>

Nguyen, T. K. T., Nguyen, T. B., Chen, W. H., Chen, C. W., Kumar Patel, A., Bui, X. T., Chen, L., Singhanian, R. R., & Dong, C. Di. (2023a). Phosphoric acid-activated bioçar derived from sunflower seed husk: Selective antibiotic adsorption behavior and mechanism. *Bioresource Technology*, 371. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128593>

Nguyen, T. K. T., Nguyen, T. B., Chen, W. H., Chen, C. W., Kumar Patel, A., Bui, X. T., Chen, L., Singhanian, R. R., & Dong, C. Di. (2023b). Phosphoric acid-activated bioçar derived from sunflower seed husk: Selective antibiotic adsorption behavior and mechanism. *Bioresource Technology*, 371. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128593>

Pandey, D., Daverey, A., Dutta, K., & Arunachalam, K. (2022). Bioremoval of toxic malahite green from water through simultaneous decolorization and degradation using laccase immobilized bioçar. *Chemosphere*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134126>

Panwar, N. L., & Pawar, A. (2020). Influence of activation conditions on the physicochemical properties of activated bioçar: A review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1–23.

Park, J. H., Wang, J. J., Meng, Y., Wei, Z., DeLaune, R. D., & Seo, D. C. (2019). Adsorption/desorption behavior of cationic and anionic dyes by bioçars prepared at normal and high pyrolysis temperatures. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical*

and Engineering Aspects, 572, 274–282.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.04.029>

Patra, B. R., Mukherjee, A., Nanda, S., & Dalai, A. K. (2021). Bioçar production, activation and adsorptive applications: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 19, Issue 3, pp. 2237–2259). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01165-9>

Patra, B. R., Mukherjee, A., Nanda, S., & Dalai, A. K. (2021). Bioçar production, activation and adsorptive applications: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 19, Issue 3, pp. 2237–2259). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01165-9>

Piscitelli, L., Rivier, P. A., Mondelli, D., Miano, T., & Joner, E. J. (2018). Assessment of addition of bioçar to filtering mixtures for potential water pollutant removal. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(3), 2167–2174. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0650-6>

Ponnuchamy, M., Kapoor, A., Pakkirisamy, B., Sivaraman, P., & Ramasamy, K. (2020). Optimization, equilibrium, kinetic and thermodynamic studies on adsorptive remediation of phenol onto natural guava leaf powder. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(17), 20576–20597. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07145-z>

Praveen, S., Jegan, J., Bhagavathi Pushpa, T., Gokulan, R., & Bulgariu, L. (2022). Bioçar for removal of dyes in contaminated water: an overview. In *Bioçar* (Vol. 4, Issue 1). Springer. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00131-8>

Pursell, C. J., Hartshorn, H., Ward, T., Chandler, B. D., & Boccuzzi, F. (2011). Application of the Temkin model to the adsorption of CO on gold. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(48), 23880–23892.

Qian, K., Kumar, A., Zhang, H., Bellmer, D., & Huhnke, R. (2015). Recent advances in utilization of bioçar. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 42, pp. 1055–1064). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.074>

Qiu, B., Shao, Q., Shi, J., Yang, C., & Chu, H. (2022). Application of bioçar for the adsorption of organic pollutants from wastewater: Modification strategies, mechanisms and challenges. In *Separation and Purification Technology* (Vol. 300). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121925>

Qu, W., Yuan, T., Yin, G., Xu, S., Zhang, Q., & Su, H. (2019). Effect of properties of activated carbon on malahite green adsorption. *Fuel*, 249, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.058>

Raji, Z., Karim, A., Karam, A., & Khalloufi, S. (2023). Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation—A Review. *Waste*, 1(3), 775–805. <https://doi.org/10.3390/waste1030046>

Ramesh, B., Saravanan, A., Kumar, P. S., Yaashikaa, P. R., Thamarai, P., Shaji, A., & Rangasamy, G. (2023). A review on algae biosorption for the removal of hazardous pollutants from wastewater: Limiting factors, prospects and recommendations. *Environmental Pollution*, 121572.

Rangabhashiyam, S., & Balasubramanian, P. (2018). Performance of novel biosorbents prepared using native and NaOH treated *Peltophorum pterocarpum* fruit shells for the removal of malachite green. *Bioresource Technology Reports*, 3, 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.06.004>

Rápó, E., & Tonk, S. (2021). Factors affecting synthetic dye adsorption; desorption studies: A review of results from the last five years (2017–2021). In *Molecules* (Vol. 26, Issue 17). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules26175419>

Rashed, M. N. (2013). Adsorption technique for the removal of organic pollutants from water and wastewater. *Organic Pollutants-Monitoring, Risk and Treatment*, 7, 167–194.

Raval, N. P., Shah, P. U., & Shah, N. K. (2017). Malachite green “a cationic dye” and its removal from aqueous solution by adsorption. In *Applied Water Science* (Vol. 7, Issue 7, pp. 3407–3445). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0512-2>

REED, B. E., & CLINE, S. R. (1994). Retention and release of lead by a very fine sandy loam. I. Isotherm modeling. *Separation Science and Technology*, 29(12), 1529–1551.

Ren, H., Zhang, R., Wang, Q., Pan, H., & Wang, Y. (2016). Garlic root biomass as novel biosorbents for malachite green removal: Parameter optimization, process kinetics and toxicity test. *Chemical Research in Chinese Universities*, 32(4), 647–654. <https://doi.org/10.1007/s40242-016-6095-5>

Robinson, J., Binner, E., Vallejo, D. B., Perez, N. D., Al Mughairi, K., Ryan, J., Shepherd, B., Adam, M., Budarin, V., Fan, J., Gronnow, M., & Peneranda-Foix, F. (2022). Unravelling the mechanisms of microwave pyrolysis of biomass. *Chemical Engineering Journal*, 430. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132975>

Saadi, R., Saadi, Z., Fazaeli, R., & Fard, N. E. (2015). Monolayer and multilayer adsorption isotherm models for sorption from aqueous media. In *Korean Journal of Chemical Engineering* (Vol. 32, Issue 5, pp. 787–799). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s11814-015-0053-7>

Saha, P., Chowdhury, S., Gupta, S., Kumar, I., & Kumar, R. (2010). Assessment on the removal of malachite green using tamarind fruit shell as biosorbent. *Clean - Soil, Air, Water*, 38(5–6), 437–445. <https://doi.org/10.1002/clen.200900234>

Sajjadi, B., Chen, W. Y., & Egiebor, N. O. (2019). A comprehensive review on physical activation of biochar for energy and environmental applications. *Reviews in Chemical Engineering*, 35(6), 735–776. <https://doi.org/10.1515/revce-2017-0113>

Sakhiya, A. K., Anand, A., & Kaushal, P. (2020). Production, activation, and applications of bioçar in recent times. In *Bioçar* (Vol. 2, Issue 3, pp. 253–285). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00047-1>

Saletnik, B., Zagula, G., Bajcar, M., Tarapatsky, M., Bobula, G., & Puchalski, C. (2019). Bioçar as a multifunctional component of the environment-a review. In *Applied Sciences* (Switzerland) (Vol. 9, Issue 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app9061139>

Savran, A., Selçuk, N., Kubilay, Ş., & Kul, A. (2017). Adsorption isotherm models for dye removal by *paliurus spinachristi* mill. frutis and seeds in a single component system. *IOSR J. Environ. Sci. Toxicol. Food Technol*, 11(04), 18–30.

Selvam S, M., & Paramasivan, B. (2022). Microwave assisted carbonization and activation of bioçar for energy-environment nexus: A review. *Chemosphere*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131631>

Shah, A. J., Soni, B., & Karmee, S. K. (2022). Application of cotton stalk bioçar as a biosorbent for the removal of malahite green and its microwave-assisted regeneration. *Energy, Ecology and Environment*, 7(1), 88–96. <https://doi.org/10.1007/s40974-021-00217-2>

Shutterstock. (n.d.). Figure 3.1 [Image]. Retrieved from <https://www.shutterstock.com/tr/search/adsorption>

Singh, V. K., Soni, A. B., & Singh, R. K. (2016). Process optimization studies of Malahite Green dye adsorption onto eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) wood bioçar using response surface methodology. *Oriental Journal of Chemistry*, 32(5), 2621–2631. <https://doi.org/10.13005/ojc/320534>

Sismanoglu, S., Akalin, M. K., Akalin, G. O., & Topak, F. (2023). Effective removal of cationic dyes from aqueous solutions by using black cumin (*Nigella sativa*) seed pulp and bioçar. *Bioresources*, 18(2), 3414.

Sismanoglu, S., Abdulmahdi Shakir, S., Sahin Kol, H., Bani Hani, Y., Aghlara, E., & Akalin, M. K. (2023). Comparison of effective removal of cationic malahite green dye from waste water with three different adsorbents: date palm, date palm bioçar and phosphated bioçar. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-20.

Srivastava, A., Gupta, B., Majumder, A., Gupta, A. K., & Nimbhorkar, S. K. (2021). A comprehensive review on the synthesis, performance, modifications, and regeneration of activated carbon for the adsorptive removal of various water pollutants. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106177>

Srivatsav, P., Bhargav, B. S., Shanmugasundaram, V., Arun, J., Gopinath, K. P., & Bhatnagar, A. (2020). Bioçar as an eco-friendly and economical adsorbent for the removal of colorants (Dyes) from aqueous environment: A review. In *Water* (Switzerland) (Vol. 12, Issue 12). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w12123561>

Stirk, W. A., & Van Staden, J. (2001). Some physical factors affecting adsorption of heavy metals from solution by dried brown seaweed material. *South African Journal of Botany*, 67(4), 615–619. [https://doi.org/10.1016/S0254-6299\(15\)31191-1](https://doi.org/10.1016/S0254-6299(15)31191-1)

Su, X., Wang, X., Ge, Z., Bao, Z., Lin, L., Chen, Y., Dai, W., Sun, Y., Yuan, H., Yang, W., Meng, J., Wang, H., & Pillai, S. C. (2024). Koh-activated bioçar and chitosan composites for efficient adsorption of industrial dye pollutants. *Chemical Engineering Journal*, 486. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150387>

Sudhakaran, A., Rajan, R., & Ravindranath, A. (2022). Çaracterization and Application of Bioçar from Spent Fermentation Sludge of Coir Wastes in Removing Malahite green from Effluent Water. *Pollution*, 8(3), 1026–1037. <https://doi.org/10.22059/POLL.2022.337925.1340>

Tahir, A. H. F., Al-Obaidy, A. H. M. J., & Mohammed, F. H. (2020). Bioçar from date palm waste, production, çaracteristics and use in the treatment of pollutants: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012171>

Tan, R. R. (2019). Data challenges in optimizing bioçar-based carbon sequestration. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 104, pp. 174–177). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.032>

Tien, C. (2018). *Introduction to adsorption: Basics, analysis, and applications*. Elsevier.

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Bioçar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 19, Issue 1, pp. 191–215). Springer. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>

Uddin, M. N., Techato, K., Taweekun, J., Rahman, M. M., Rasul, M. G., Mahlia, T. M. I., & Ashrafur, S. M. (2018). An overview of recent developments in biomass pyrolysis technologies. In *Energies* (Vol. 11, Issue 11). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en11113115>

Ugege, B., & Leonard, E. (2016). Regeneration of enteric bacteria spent zn-doped hybrid clay adsorbent.

Ugraskan, V., Isik, B., Yazici, O., & Cakar, F. (2022). Removal of Safranin T by a highly efficient adsorbent (*Cotinus Coggygia* leaves): Isotherms, kinetics, thermodynamics, and surface properties. *Surfaces and Interfaces*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101615>

Venderbosch, R. H., & Prins, W. (2010). Fast pyrolysis technology development. In *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* (Vol. 4, Issue 2, pp. 178–208). <https://doi.org/10.1002/bbb.205>

Vigneshwaran, S., Sirajudheen, P., Karthikeyan, P., & Meenakshi, S. (2021). Fabrication of sulfur-doped biochar derived from tapioca peel waste with superior adsorption performance for the removal of Malachite green and Rhodamine B dyes. *Surfaces and Interfaces*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100920>

Villota, E. M., Lei, H., Qian, M., Yang, Z., Villota, S. M. A., Zhang, Y., & Yadavalli, G. (2018). Optimizing microwave-assisted pyrolysis of phosphoric acid-activated biomass: impact of concentration on heating rate and carbonization time. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(1), 1318–1326.

Vintu, M., & Unnikrishnan, G. (2019). Indolocarbazole based polymer coated super adsorbent polyurethane sponges for oil/organic solvent removal. *Journal of Environmental Management*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109344>

Vyavahare, G. D., Gurav, R. G., Jadhav, P. P., Patil, R. R., Aware, C. B., & Jadhav, J. P. (2018). Response surface methodology optimization for sorption of malachite green dye on sugarcane bagasse biochar and evaluating the residual dye for phyto and cytogenotoxicity. *Chemosphere*, 194, 306–315. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.180>

W John Thomas, Fe., & Crittenden, B. (1998). *Adsorption technology and design*. Butterworth-Heinemann.

Wang, C., Li, G., Karmakar, B., AlSalem, H. S., Shati, A. A., El-kott, A. F., Elsaid, F. G., Bani-Fwaz, M. Z., Alsayegh, A. A., Salem Alkhayyat, S., & El-Saber Batiha, G. (2022). Pectin mediated green synthesis of Fe₃O₄/Pectin nanoparticles under ultrasound condition as an anti-human colorectal carcinoma bionanocomposite. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(6). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103867>

Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 227, pp. 1002–1022). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>

Wang, J., & Wang, S. (2019a). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 227, pp. 1002–1022). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>

Wang, J., & Wang, S. (2019b). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 227, pp. 1002–1022). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>

Wang, L., Karmakar, B., Al-Saeed, F. A., Shati, A. A., Bani-Fwaz, M. Z., & El-kott, A. F. (2022). Green synthesis of Ag/Fe₃O₄ nanoparticles using *Mentha longifolia* flower extract: evaluation of its antioxidant and anti-lung cancer effects. *Heliyon*, 8(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12326>

Wang, S., Dai, G., Yang, H., & Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 62, pp. 33–86). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2017.05.004>

WEBER JR, W. J. (2013). The University of Michigan, College of Engineering, Ann Arbor, Michigan 48104, USA. XXIVth International Congress of Pure and Applied Chemistry: Main Section Lectures Presented at Two Joint Symposia Held During the Above Congress at Hamburg, Federal Republic of Germany, 2–8 September 1973, 375.

Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of bioçar. In *Fuel* (Vol. 217, pp. 240–261). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>

Xie, T., Reddy, K. R., Wang, C., Yargicoglu, E., & Spokas, K. (2015). Çaracteristics and applications of bioçar for environmental remediation: A review. In *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* (Vol. 45, Issue 9, pp. 939–969). Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.924180>

Xue, Y., Karmakar, B., AlSalem, H. S., Binkadem, M. S., Al-Goul, S. T., Bani-Fwaz, M. Z., El-kott, A. F., Ageeli, A. M., Alsayegh, A. A., & El-Saber Batiha, G. (2022). Green Nanoarchitectonics of Cu/Fe₃O₄ Nanoparticles Using *Helleborus niger* Extract Towards an Efficient Nanocatalyst, Antioxidant and Anti-lung Cancer Agent. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 32(9), 3585–3594. <https://doi.org/10.1007/s10904-022-02430-w>

Yan, X., Sun, Y., Ma, C., Kong, X., Zhang, Y., & Tao, W. (2021). Adsorption of Anionic and Cationic Dyes on Different Bioçars. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 95(10), 2031–2041. <https://doi.org/10.1134/S0036024421100289>

Yao, X., Ji, L., Guo, J., Ge, S., Lu, W., Chen, Y., Cai, L., Wang, Y., & Song, W. (2020a). An abundant porous bioçar material derived from wakame (*Undaria pinnatifida*) with high adsorption performance for three organic dyes. *Bioresource Technology*, 318. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124082>

Yao, X., Ji, L., Guo, J., Ge, S., Lu, W., Chen, Y., Cai, L., Wang, Y., & Song, W. (2020b). An abundant porous bioçar material derived from wakame (*Undaria pinnatifida*) with high adsorption performance for three organic dyes. *Bioresource Technology*, 318. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124082>

Zafar, L., Khan, A., Kamran, U., Park, S. J., & Bhatti, H. N. (2022). Eucalyptus (*camaldulensis*) bark-based composites for efficient Basic Blue 41 dye biosorption from aqueous stream: Kinetics, isothermal, and thermodynamic studies. *Surfaces and Interfaces*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.101897>

Zafar, L., Khan, A., Kamran, U., Park, S. J., & Bhatti, H. N. (2022). Eucalyptus (*camaldulensis*) bark-based composites for efficient Basic Blue 41 dye biosorption from aqueous stream: Kinetics, isothermal, and thermodynamic studies. *Surfaces and Interfaces*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.101897>

Zaidi, N. A. H. M., Lim, L. B. L., & Usman, A. (2019). Enhancing adsorption of malachite green dye using base-modified *Artocarpus odoratissimus* leaves as adsorbents. *Environmental Technology and Innovation*, 13, 211–223. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.12.002>

Zhang, X., Gao, B., Zheng, Y., Hu, X., Creamer, A. E., Annable, M. D., & Li, Y. (2017a). Bioçar for volatile organic compound (VOC) removal: Sorption performance and governing mechanisms. *Bioresource Technology*, 245, 606–614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.025>

Zhang, X., Gao, B., Zheng, Y., Hu, X., Creamer, A. E., Annable, M. D., & Li, Y. (2017b). Bioçar for volatile organic compound (VOC) removal: Sorption performance and governing mechanisms. *Bioresource Technology*, 245, 606–614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.025>

Zhang, X., Rajagopalan, K., Lei, H., Ruan, R., & Sharma, B. K. (2017). An overview of a novel concept in biomass pyrolysis: microwave irradiation. In *Sustainable Energy and Fuels* (Vol. 1, Issue 8, pp. 1664–1699). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/C7SE00254H>

Zubair, M., Mu'azu, N. D., Jarrah, N., Blaisi, N. I., Aziz, H. A., & A. Al-Harhi, M. (2020a). Adsorption Behavior and Mechanism of Methylene Blue, Crystal Violet, Eriochrome Black T, and Methyl Orange Dyes onto Bioçar-Derived Date Palm Fronds Waste Produced at Different Pyrolysis Conditions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231(5). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04595-x>

Zubair, M., Mu'azu, N. D., Jarrah, N., Blaisi, N. I., Aziz, H. A., & A. Al-Harhi, M. (2020b). Adsorption Behavior and Mechanism of Methylene Blue, Crystal Violet, Eriochrome Black T, and Methyl Orange Dyes onto Bioçar-Derived Date Palm Fronds Waste Produced at Different Pyrolysis Conditions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231(5). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04595-x>

Zorpas AA, Doula MK, Jeguirim M (2021) Waste strategies development in the framework of circular economy. *Sustainability* 1:13467. <https://doi.org/10.3390/su132313467>

Tezden ıkan yayımlar

Sismanoglu, S., Abdulmahdi Shakir, S., Sahin Kol, H., Bani Hani, Y., Aghlara, E., & Akalin, M. K. (2023). Comparison of effective removal of cationic malachite green dye from waste water with three different adsorbents: date palm, date palm biochar and phosphated biochar. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-20.

ÖZGEÇMİŞ

Safa Abdulmahdey Shaker 2011 yılında Babil Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu ve 2012 yılında Babil Üniversitesi Danışmanlık Bürosu'nda çalışmaya başladı. 2021 yılında Sağlık Bakanlığı'nda çalışmaya başladı. 2020 yılında Karabük Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümünde yüksek lisansını tamamlamaya başladı.