



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**ÇİLEK SAPLARININ KULLANILDIĞI ADSORPSİYON PROSESİNİN  
ETKİNLİĞİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HANDE SUSTAN

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. SAHRA DANDIL

BİLECİK, 2026

10792458

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**ÇİLEK SAPLARININ KULLANILDIĞI ADSORPSİYON PROSESİNİN  
ETKİNLİĞİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HANDE SUSTAN

TEZ DANIŞMANI

DOĐ. DR. SAHRA DANDIL

BİLECİK, 2026

10792458

## BEYAN

'Çilek saplarının kullanıldığı adsorpsiyon prosesinin etkinliğinin belirlenmesi' başlıklı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, [Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine](#) uygun olarak tez projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışma Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından GAP-2024-549 nolu proje ile desteklenmiştir.

**Hande SUSTAN**

.././20...

**İmza:**

## ÖN SÖZ

Bu tez çalışması, “Çilek Saplarının Kullanıldığı Adsorpsiyon Prosesinin Etkinliğinin Belirlenmesi” başlığı altında, çevresel kirliliğin azaltılmasına yönelik alternatif ve sürdürülebilir bir adsorban malzemenin değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Çalışmada, tarımsal bir atık olan çilek saplarının boyar madde giderimindeki potansiyeli adsorpsiyon yöntemiyle incelenmiştir.

Tez çalışmamın planlanması, yürütülmesi ve sonuçlandırılması sürecinde bilgi ve deneyimleriyle her aşamada yol gösteren, değerli katkı ve desteklerini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Sahra DANDIL’a içtenlikle teşekkür ederim.

Çalışmamı GAP-2024-549 kodlu proje ile maddi açıdan destekleyen Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü’ne,

Çalışmalarım süresince sabır, anlayış ve manevi desteğiyle her zaman yanımda olan eşim Hakan SUSTAN’a, neşesi ve yaşam enerjisiyle bana güç veren oğlum Hamza SUSTAN’a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma kapsamında doğrudan veya dolaylı olarak katkı sağlayan tüm kişi ve kurumlara teşekkür eder, çalışmanın ilgili alanda yapılacak araştırmalara faydalı olmasını temenni ederim.

**Hande SUSTAN**

**2026**

## ÖZET

Bu çalışmada, Metil Oranj boyar maddesini içeren sulu ortamlardan, boyar maddenin giderilmesi amacıyla çilek saplarından üretilmiş bir adsorban malzeme geliştirilmiştir. Adsorban malzemenin üretimi için ısı ve  $K_2CO_3$  aktivasyonundan yararlanılmıştır. Hazırlanan adsorbanın çeşitli özelliklerinin belirlenmesi için FTIR, elementel analiz, BET, SEM/EDX, TGA ve XRD yöntemleri uygulanmıştır. Adsorpsiyon prosesleri üzerinde etkili olan çok sayıda parametrenin (başlangıç boyar madde konsantrasyonu, çözelti pH'ı, çalkalama hızı, çözelti sıcaklığı, adsorban miktarı ve temas süresi gibi) farklı seviyeleri deneysel olarak araştırılmıştır. Adsorpsiyon kinetiği YBD ve YİD modellerle, denge davranışı ise Langmuir ve Freundlich izotermi ile analiz edilmiş; ayrıca termodinamik parametreler de hesaplanmıştır.

Çilek saplarından hazırlanan adsorbanın Metil Oranj adsorpsiyonunu destekleyecek aktif grupları açıklanmıştır. Adsorbanın yüksek karbon içeriği karakterizasyon teknikleri ile ortaya konmuştur. Adsorban yüzey özelliklerine göre; heterojen yapılı, gözenekli ve geniş yüzey alanına sahip olarak tanımlanmıştır. Adsorpsiyon deneyleri ile etkili parametrelerin en uygun değerleri belirlenmiştir. Temas süresi çalışması ile Metil Oranj adsorpsiyonunun dengeye 660 dakikada ulaştığı artık değişmeyen konsantrasyon değerlerinden anlaşılmıştır. Çilek sapları ile hazırlanan adsorban %97,82 Metil Oranj adsorpsiyon yüzdesi sergilemiştir. Çilek sapları ile Metil Oranj boyar maddesi arasında gerçekleşen kimyasal adsorpsiyon, kinetik analizler sonucunda prosesin YİD modele uygunluğu ile ortaya koymuştur. Ayrıca Metil Oranj moleküllerinin adsorban yüzeyine düzenli ve tek tabakalı dizilimini Langmuir izoterm modeli açıklamıştır. Adsorpsiyon sırasında azalan düzensizlik ve bu ekzotermik olay termodinamik incelemeler sonucunda tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Adsorpsiyon, Aktif karbon, Çilek, Metil Oranj.

## ABSTRACT

In this study, an adsorbent material produced from strawberry stems was developed for the removal of Methyl Orange dye from aqueous media containing the dye. Heat and  $K_2CO_3$  activation were used for the production of the adsorbent material. FTIR, elemental analysis, BET, SEM/EDX, TGA, and XRD methods were applied to determine various properties of the prepared adsorbent. Different levels of many parameters affecting the adsorption processes (such as initial dye concentration, solution pH, shaking speed, solution temperature, adsorbent amount, and contact time) were experimentally investigated. Adsorption kinetics were analyzed using PFO and PSO models, and equilibrium behavior was analyzed using Langmuir and Freundlich isotherms; thermodynamic parameters were also calculated.

The active groups supporting the adsorption of Methyl Orange in the adsorbent prepared from strawberry stems were described. The high carbon content of the adsorbent was revealed using characterization techniques. Based on the surface properties of the adsorbent; the adsorbent material is described as having a heterogeneous, porous structure and a large surface area. Adsorption experiments determined the optimal values of the effective parameters. Contact time studies showed that Methyl Orange adsorption reached equilibrium in 660 minutes, as evidenced by the unchanging concentration values. The adsorbent prepared with strawberry stems exhibited a 97.82% Methyl Orange adsorption percentage. The chemical adsorption between strawberry stems and Methyl Orange dye was demonstrated through kinetic analysis, confirming the process's suitability for the PSO model. Furthermore, the regular and single-layer arrangement of Methyl Orange molecules on the adsorbent surface was explained by the Langmuir isotherm model. The decreasing disorder during adsorption and this exothermic phenomenon were identified through thermodynamic investigations.

**Keywords:** Adsorption, Activated carbon, Strawberry, Methyl Orange.

## İÇİNDEKİLER

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ .....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ADSORPSİYONUN TEMEL KAVRAMLARI .....</b>	<b>3</b>
2.1. Adsorpsiyonun Tanımı .....	3
2.2. Adsorpsiyon Türleri.....	4
2.2.1. Fiziksel adsorpsiyon .....	4
2.2.2. Kimyasal Adsorpsiyon .....	5
2.2.3. İyonik Adsorpsiyon .....	5
2.3. Adsorpsiyonu Etkileyen Parametreler .....	6
2.3.1. pH etkisi.....	6
2.3.2. Adsorbat Konsantrasyonu .....	6
2.3.3. Sıcaklık .....	7
2.3.4. Temas süresi .....	7
2.3.5. Adsorban dozu .....	7
2.3.6. Adsorbanın Yüzey Alanı ve Gözenek Yapısı.....	7
2.4. Adsorpsiyon İzotermi .....	8
2.4.1. Langmuir izotermi .....	8
2.4.2. Freundlich izotermi .....	9
2.4.3. Temkin izotermi .....	9

2.4.4. Dubinin–Radushkevich İzotermi.....	9
2.5. Adsorpsiyon Kinetikleri .....	10
2.5.1. Yalancı Birinci Derece (YBD) Kinetik Model.....	10
2.5.2. Yalancı İkinci Derece (YİD) Kinetik Model.....	10
2.5.3. Elovich Kinetik Model .....	11
2.6. Adsorpsiyon Sürecinin Termodinamik Değerlendirilmesi.....	11
2.7. Adsorban Türleri ve Özellikleri.....	11
2.7.1. Aktif karbonlar .....	12
2.7.2. Biyosorbanlar .....	13
2.7.3. Metal oksit bazlı adsorbanlar.....	13
2.7.4. Zeolitler .....	14
2.8. Adsorpsiyonun Endüstriyel Önemi .....	14
2.8.1. Boyar maddeler ve adsorpsiyon .....	14
<b>3. KURAMSAL TEMELLER .....</b>	<b>17</b>
<b>4. MATERYAL VE METOD .....</b>	<b>21</b>
4.1. Malzeme Hazırlığı ve Karakterizasyon .....	21
4.2. Adsorpsiyon Deneyleri.....	21
<b>5. BULGULAR ve TARTIŞMA .....</b>	<b>24</b>
5.1. Adsorbanın Karakterizasyonu .....	24
5.2. Adsorpsiyon Deneyleri.....	27
5.3. Metil Oranj ile İlgili Literatürde Yer Alan Çalışmalar.....	38
5.4. Adsorpsiyon Kinetik Çalışmaları .....	39
5.5. Adsorpsiyon İzoterm Çalışmaları.....	40
5.6. Adsorpsiyon Termodinamik Çalışmaları .....	42
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>44</b>
<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>45</b>

## TABLULAR LİSTESİ

<b>Tablo 2.1.</b> Boyar Maddelerin Sınıfları, Endüstriyel Kullanım Alanları ve Sağlık Etkileri. ....	15
<b>Tablo 5.1.</b> YBD ve YİD Model Parametreleri.....	40
<b>Tablo 5.2.</b> Langmuir ve Freundlich Model Parametreleri .....	42
<b>Tablo 5.3.</b> Termodinamik İle İlişkili Parametreler .....	43

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Gözenekli adsorban yapısı üzerinde adsorbatların yüzey ve gözenek bölgelerinde birikimi.....	3
Şekil 2.2. Adsorpsiyon-Desorpsiyon Mekanizması.....	4
Şekil 2.3. Fiziksel Adsorpsiyon.....	5
Şekil 2.4. Kimyasal Adsorpsiyon.....	5
Şekil 2.5. Adsorban Türleri.....	12
Şekil 2.5. Boya Gideriminde Kullanılan Düşük Maliyetli Adsorbanlar.....	16
Şekil 5.1. FTIR analizi.....	24
Şekil 5.2. SEM görüntüsü.....	25
Şekil 5.3. TGA Grafiği.....	26
Şekil 5.4. XRD deseni.....	27
Şekil 5.5. Adsorpsiyon Yüzdesinin Başlangıç Konsantrasyonuna Bağlı Değişimi.....	28
Şekil 5.6. Adsorpsiyon Kapasitesinin Başlangıç Konsantrasyonuna Bağlı Değişimi.....	29
Şekil 5.7. Adsorpsiyon Yüzdesinin pH'a Bağlı Değişimi.....	30
Şekil 5.8. Adsorpsiyon Kapasitesinin pH'a Bağlı Değişimi.....	31
Şekil 5.9. Sıfır Yük Noktası ( $pH_{pzc}$ ).....	32
Şekil 5.10. Adsorpsiyon Yüzdesinin Çalkalama Hızına Bağlı Değişimi.....	33
Şekil 5.11. Adsorpsiyon Kapasitesinin Çalkalama Hızına Bağlı Değişimi.....	33
Şekil 5.12. Adsorpsiyon Yüzdesinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi.....	34
Şekil 5.13. Adsorpsiyon Kapasitesinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi.....	35
Şekil 5.14. Adsorpsiyon Yüzdesinin Adsorban Miktarına Bağlı Değişimi.....	36
Şekil 5.15. Adsorpsiyon Kapasitesinin Adsorban Miktarına Bağlı Değişimi.....	36
Şekil 5.16. Adsorpsiyon Yüzdesinin Zamana Bağlı Değişimi.....	37
Şekil 5.17. Adsorpsiyon Kapasitesinin Zamana Bağlı Değişimi.....	38
Şekil 5.18. YBD Denklem Eğrisi.....	39

<b>Şekil 5.19.</b> YİD Denklem Eğrisi .....	40
<b>Şekil 5.20.</b> Langmuir Model Eğrisi.....	41
<b>Şekil 5.21.</b> Freundlich Model Eğrisi .....	41
<b>Şekil 5.22.</b> $\ln (q_e/C_e)$ 'ye karşı $1/T$ grafiği .....	42

## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

<b>1/n</b>	: Adsorpsiyon Yoğunluğu veya Şiddeti
<b>As(V)</b>	: Pentavalen Arsenik
<b>ar</b>	: Maksimum Bağlanma Kapasitesini Temsil Eden Temkin İzoterm Sabiti
<b>BET</b>	: Brunauer–Emmett–Teller
<b>b<sub>T</sub></b>	: Adsorpsiyon Isısı ile İlişkili Temkin Sabiti
<b>C</b>	: Karbon
<b>C<sub>0</sub></b>	: Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonu
<b>Cd(II)</b>	: Kadmiyum (II) İyonu
<b>C<sub>e</sub></b>	: Denge Konsantrasyonu
<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbondioksit
<b>Cr(III)</b>	: Krom (III) İyonu
<b>Cu(II)</b>	: Bakır (II) İyonu
<b>EDX</b>	: Enerji Dağılımlı X-Işını Analizi
<b>Eu(III)</b>	: Europiyum (III) İyonu
<b>Fe(III)</b>	: Demir (III) İyonu
<b>FTIR</b>	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
<b>γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Gama Alüminyum Oksit
<b>γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Gama Demir (III) Oksit
<b>H</b>	: Hidrojen
<b>H<sup>+</sup></b>	: Hidrojen İyonu
<b>k<sub>1</sub></b>	: Yalancı Birinci Derece Kinetik Sabiti
<b>k<sub>2</sub></b>	: Yalancı İkinci Derece Kinetik Sabiti
<b>K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	: Potasyum Karbonat
<b>k<sub>a</sub></b>	: Adsorpsiyon Hız Sabiti
<b>K<sub>c</sub></b>	: Boyutsuz Denge Sabiti
<b>K<sub>D</sub></b>	: Dubinin–Radushkevich Sabiti
<b>k<sub>d</sub></b>	: Desorpsiyon Hız Sabiti
<b>K<sub>F</sub></b>	: Freundlich Sabiti
<b>K<sub>L</sub></b>	: Langmuir Sabiti
<b>m</b>	: Adsorban miktarı
<b>Mn(II)</b>	: Manganez (II) İyonu
<b>MnO<sub>2</sub></b>	: Manganez Dioksit

<b>MO</b>	: Metil Oranj (Methyl Orange)
<b>NaCl</b>	: Sodyum Klorür
<b>N<sub>2</sub></b>	: Azot Gazı
<b>Ni(II)</b>	: Nikel (II) İyonu
<b>NMR</b>	: Nükleer Manyetik Rezonans Spektroskopisi
<b>O</b>	: Oksijen
<b>OH<sup>-</sup></b>	: Hidroksit İyonu
<b>PFO</b>	: Pseudo-first-order
<b>PSO</b>	: Pseudo-second-order
<b>P/P<sub>0</sub></b>	: Bağlı Basınç
<b>Pb(II)</b>	: Kurşun (II) İyonu
<b>pH<sub>pzc</sub></b>	: Sıfır Yük Noktası pH'ı
<b>q<sub>e</sub></b>	: Dengede Adsorbe Edilen Madde Miktarı
<b>q<sub>m</sub></b>	: Maksimum Adsorpsiyon Kapasitesi
<b>q<sub>t</sub></b>	: Zamana Bağlı Adsorbe Olmuş Madde Miktarı
<b>R</b>	: Evrensel Gaz Sabiti
<b>R<sup>2</sup></b>	: Regresyon Katsayısı
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskopu
<b>T</b>	: Mutlak Sıcaklık
<b>t</b>	: Zaman
<b>TGA</b>	: Termogravimetrik Analiz
<b>Th(IV)</b>	: Toryum (IV) İyonu
<b>TiO<sub>2</sub></b>	: Titanyum Dioksit
<b>UNICEF</b>	: Birleşmiş Milletler Çocuklara Yardım Fonu
<b>USEPA</b>	: Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı
<b>UV/Vis</b>	: Ultraviyole/Görünür Bölge
<b>V</b>	: Çözelti hacmi
<b>YBD</b>	: Yalancı Birinci Derecede Kinetik Model
<b>YİD</b>	: Yalancı İkinci Derecede Kinetik Model
<b>Zn(II)</b>	: Çinko (II) İyonu
<b>ΔG</b>	: Gibbs Serbest Enerjisi
<b>ΔH</b>	: Entalpi değişimi
<b>ΔpH</b>	: pH değişimi

$\Delta S$	: Entropi değişimi
$\epsilon$	: Polanyi Potansiyeli
$\theta$	: Bragg Açısı (X-Işını Kırınım Açısı)
$\alpha$	: Başlangıç Adsorpsiyon Hızı
$\beta$	: Yüzey Örtülmesi İle İlişkili Sabit

## 1. GİRİŞ

Temiz ve yeterli miktarda suya erişim, insan sağlığının korunması için temel bir gerekliliktir. Ancak günümüzde içilebilir su kaynaklarının giderek azalması önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır (Nthwane vd., 2025). Günümüzde küresel su kıtlığı ciddi boyutlara ulaşmış olup, bu durum atıksu arıtımının önemini artırmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü ve UNICEF'in 2021 yılı verilerine göre, dünya genelinde yaklaşık 616 milyon insan uygun bir atıksu arıtma altyapısından yoksundur ve bu nüfusun yaklaşık %92'si kırsal bölgelerde yaşamaktadır. Bu göstergeler, özellikle kırsal alanlarda sürdürülebilir ve erişilebilir arıtma teknolojilerine duyulan ihtiyacın halen büyük ölçüde karşılanamadığını ortaya koymaktadır (Al-Ghouti ve Da'ana, 2020).

Su kirliliğinin son yirmi yılda giderek büyümesiyle birlikte, özellikle organik boyar maddeler, ağır metal iyonları ve farmasötik bileşikler içeren endüstriyel atıksuların kontrolsüz olarak yüzeysel su kaynaklarına deşarjı, araştırmacılar ile politikacıların dikkatini çeken küresel ölçekte önemli bir çevresel sorun haline gelmiştir (Bai vd., 2025; Nath vd., 2025). Bu durum hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde çözümü zorlayıcı bir sorun olarak varlığını sürdürmektedir. Uzun yıllar boyunca ağır sanayileşme, hızlı kentleşme, düzensiz kanalizasyon deşarjı, evsel atıklar ve petrol sızıntıları gibi pek çok etken bu problemin daha da karmaşık hale gelmesine neden olmuştur. Yeraltı suyu miktarları ve kalitesi ise tuzlu su girişimi ve atık bertaraf alanlarından sızan kirleticiler nedeniyle olumsuz etkilenmektedir (Nthwane vd., 2025).

Su ekosistemleri; sentetik boyar maddeler, ağır metaller ve çeşitli endüstriyel atık sular karşısında oldukça savunmasızdır. Endüstriyel kirleticiler arasında, elektro kaplama, pil üretimi, tekstil, kâğıt, plastik, gıda ve ilaç endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan sentetik boyar maddeler kalıcı yapıları ve karmaşık moleküler özellikleri nedeniyle öne çıkmaktadır ve endüstride sentetik boyar maddelerin kullanımının artmasıyla birlikte, bu boyar maddeler su ekosistemlerini tehdit eden önemli kirleticilerden biri haline gelmiştir (Bai vd., 2025; Nath vd., 2025). Dünya Sağlık Örgütü'ne göre boyama işlemleri su kirliliğinin yaklaşık %17–20'sine neden olmakta; süreçte boyanın %20'si atık suya karışarak içme suyu kaynaklarını kirletmektedir. Toksik ve kanserojen boyar maddeler içeren bu atık sular, cilt tahrişi ve alerjik dermatit gibi sağlık sorunlarına yol açmaktadır (Longchar vd.,2026).

Bu doğrultuda, boyar maddelerin su ortamlarından etkin bir şekilde uzaklaştırılmasına yönelik çevre dostu, ekonomik ve sürdürülebilir arıtma yöntemlerinin geliştirilmesi büyük

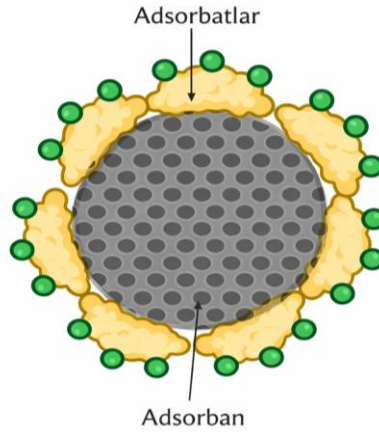
önem taşımaktadır. Geleneksel fiziksel ve kimyasal arıtma yöntemleri yüksek maliyet, ikincil kirletici oluşumu ve sınırlı verim gibi dezavantajlar barındırırken, adsorpsiyon temelli yaklaşımlar yüksek giderim verimi, basit uygulama prensibi ve düşük işletme maliyeti ile öne çıkmaktadır. Tez çalışması, su ekosistemleri üzerinde ciddi tehdit oluşturan boyar maddelerin adsorpsiyon yöntemi ile giderimine yönelik olarak, Metil Oranj boyar maddesinin, bulunduğu sulu ortamlardan giderilmesi amacıyla çilek saplarından üretilmiş bir adsorban malzemenin etkinliğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Elde edilen bulguların, özellikle atıksu arıtımında çevresel sürdürülebilirliği destekleyen alternatif teknolojilerin geliştirilmesine katkı sağlaması ve boyar maddeler kaynaklı su kirliliği sorununa uygulanabilir bir çözüm sunması hedeflenmektedir.

## 2. ADSORPSİYONUN TEMEL KAVRAMLARI

### 2.1. Adsorpsiyonun Tanımı

*Adsorpsiyon*, katı ya da sıvı yüzeylerin gazları veya çözülmüş maddeleri tutmasıyla gerçekleşen bir kütle transferi mekanizmasıdır (Abegunde vd., 2020). Adsorpsiyonda, geniş özgül yüzey alanına sahip olan ve tutunmanın gerçekleştiği faz *adsorban*, akışkan fazdan taşınarak adsorban yüzeyinde biriken gaz veya çözülmüş tür ise *adsorbat* olarak tanımlanmaktadır (El Meziani vd., 2025). Bu mekanizma; adsorbatın kütle çözeltilisinden adsorban yüzeyini çevreleyen durgun tabakaya taşınması, bu tabaka boyunca difüzyonu, adsorban yüzeyine fiziksel veya kimyasal kuvvetlerle bağlanması ve ardından adsorbanın gözeneklerine doğru ilerlemesi adımlarından oluşmaktadır (Shah ve Farooq, 2025).

Adsorpsiyon olayında, adsorplanan türlerin sahip oldukları fonksiyonel gruplar adsorbanın yüzeyindeki aktif merkezlerle etkileşime girer. Adsorban yüzeyi, bağlanma kapasitesi tam olarak doymamış atomları içeren aktif merkezlerden oluşur ve bu nedenle moleküllerin yüzeye tutunmasına olanak sağlar (Demir ve Yalçın, 2014). Şekil 2.1, adsorplanan maddelerin adsorbanın yüzeyine tutunmasını göstermektedir (Sivamani ve Grace, 2009).

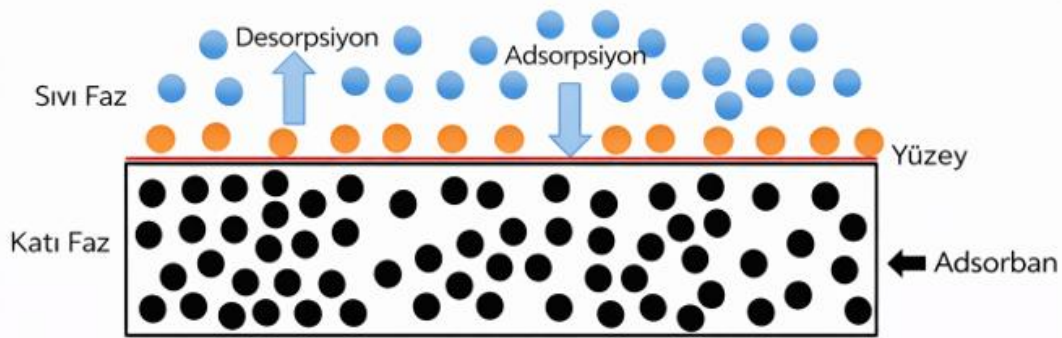


**Şekil 1.1.** Gözenekli adsorban yapısı üzerinde adsorbatların yüzey ve gözenek bölgelerinde birikimi (Sivamani ve Grace, 2009).

Adsorpsiyon, yüksek giderim verimliliği, düşük maliyet, kullanım kolaylığı ve farklı atıksu arıtma sistemleri ile uyumluluğu sayesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Adsorpsiyon işlemi için zeolitler, oksitler, karbon bazlı materyaller, metal-organik yapılar ve kil gibi çeşitli adsorbanlar kullanılmaktadır (Hira vd., 2023). Sahip olduğu yüksek giderim kapasitesi ve farklı kirletici türlerine uygulanabilme özelliği nedeniyle adsorpsiyon, özellikle boyar maddelerin uzaklaştırılmasında atıksu arıtım süreçlerinde yaygın olarak kullanılan

yöntemlerden biri hâline gelmiştir (El Meziani vd., 2025). Adsorpsiyon performansı; pH, sıcaklık, başlangıç boya konsantrasyonu ve adsorban miktarı gibi koşullardan etkilenir ve bu parametrelerin optimize edilmesi endüstriyel süreçlerde verimliliği artırır (Kassa vd.,2025). USEPA tarafından da etkili bir arıtma tekniği olarak değerlendirilen bu yöntemin, uygun koşullar altında %99,9'a kadar ulaşan giderim verimleri sağlayabildiği rapor edilmiştir (El Meziani vd., 2025).

*Desorpsiyon*, adsorplanmış maddenin yüzeyden serbest bırakılması süreci olup, adsorpsiyonun tersinir bir tepkimesi olarak tanımlanmaktadır (Rahmawati vd., 2025). Bu süreç, çevresel ortamlarda kirleticilerin yayılımını, arıtma ve iyileştirme çalışmalarının etkinliğini ve kaynak geri kazanımını doğrudan etkilemektedir (Liu vd., 2010a). Desorpsiyon çalışmaları, adsorbanın yeniden kullanılabilirliğini değerlendirmek açısından önemlidir. Yüksek desorpsiyon verimi, adsorbanın birden fazla adsorpsiyon döngüsünde etkinliğini koruyarak kullanılabilirliğini göstermektedir (Altunkaynak vd., 2023). Adsorpsiyon–desorpsiyon sürecinin genel mekanizmasına ilişkin terminoloji Şekil 2.2’de gösterilmektedir (Rahmawati vd., 2025).

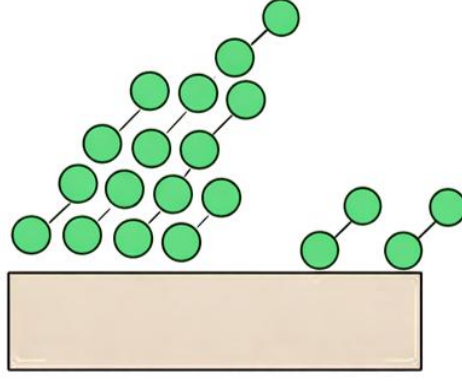


Şekil 2.2. Adsorpsiyon-Desorpsiyon Mekanizması (Rahmawati vd., 2025)

## 2.2. Adsorpsiyon Türleri

### 2.2.1. Fiziksel adsorpsiyon

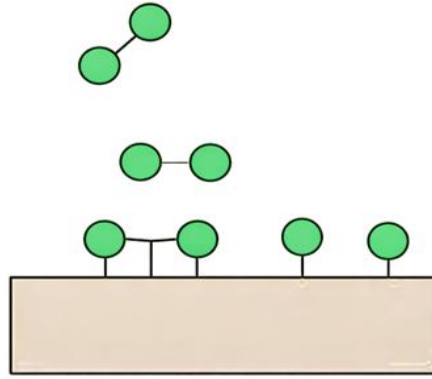
Fiziksel adsorpsiyon (fizisorpsiyon), adsorbatın adsorban yüzeyine moleküller arası zayıf çekim kuvvetleri van der Waals etkisiyle bağlandığı bir adsorpsiyon türüdür. Bu etkileşimlerin enerji düzeyinin düşük olması, sürecin çoğu durumda kolaylıkla geri döndürülebilmesine olanak tanır (El Meziani vd., 2025). Ayrıca bu zayıf etkileşimler nedeniyle, fiziksel adsorpsiyonun adsorpsiyon entalpi değerleri 20-40 kJ/mol aralığında olacak şekilde düşük değerler almaktadır (Sarı, 2022). Fiziksel adsorpsiyon Şekil 2.3(a)' da şematize edilmiştir.



Şekil 2.3. Fiziksel Adsorpsiyon (Aljamali vd., 2021).

### 2.2.2. Kimyasal Adsorpsiyon

Kimyasal adsorpsiyon (kemisorpsiyon), adsorbat ile adsorban arasında kimyasal bağların olduğu adsorpsiyon türüdür (Karaca, 2013). Kimyasal adsorpsiyon kimyasal bağlar sebebiyle tersinmezdir (Karakaş, 2019). Kimyasal adsorpsiyonda adsorpsiyon entalpisi kimyasal bağlardan kaynaklanan 80 ila 240 kJ/mol arasında değişen yüksek değerler alır (Thakur vd., 2022). Şekil 2.3(b) kimyasal adsorpsiyonu göstermektedir.



Şekil 2.4. Kimyasal Adsorpsiyon (Aljamali vd., 2021).

### 2.2.3. İyonik Adsorpsiyon

İyonik adsorpsiyon, adsorban yüzeyi ile zıt yüklü iyonlar arasındaki elektrostatik çekim sonucu gerçekleşir. Negatif yüklü yüzeyler özellikle pozitif iyonları daha etkin biçimde tutar. Adsorpsiyon verimi; iyonların elektrik yükü ve iyonik yarıçapı ile ilişkilidir; yüksek yüklü ve küçük çaplı iyonlar daha güçlü adsorplanır. Aynı yüke sahip iyonların bulunduğu ortamlarda ise iyonik boyutu daha küçük olan türler tercih edilir. İyonik adsorpsiyon çoğu zaman iyon değişimi gibi mekanizmalarla birlikte gerçekleşir ve adsorpsiyon süreci genellikle tek bir mekanizma ile açıklanamaz (Ay, 2019; Acar ve Acar, 2022).

### 2.3. Adsorpsiyonu Etkileyen Parametreler

Su arıtımında uygulanan adsorpsiyon süreçlerinin başarısı, büyük ölçüde adsorpsiyon kapasitesine bağlıdır. *Adsorpsiyon kapasitesi*, belirli çalışma koşullarında birim adsorban miktarı tarafından tutulabilen adsorbat miktarı olarak tanımlanmaktadır (Mamman vd., 2024). Bu parametre; adsorbanın fiziksel ve kimyasal özelliklerine (yüzey alanı, gözeneklilik ve fonksiyonel gruplar), adsorbatın yapısal özelliklerine (moleküler boyut, polarite vb.) bağlıdır (Acar ve Acar, 2022; Mamman vd., 2024). Adsorpsiyon verimini etkileyen diğer faktörler ise; temas süresinin etkisi, adsorban dozunun etkisi, adsorban yüzey alanı, adsorpsiyon sırasında sıcaklığın etkisi, başlangıç derişiminin etkisi, çözeltilerin asidik veya bazik yapısı olarak sıralanabilir. Bu parametreler birbirinden bağımsız çalışmamaktadır. Her bir parametre sistemin bir parçası olup herhangi birindeki değişiklik diğerlerini de doğrudan etkilemektedir (Mamman vd., 2024).

#### 2.3.1. pH etkisi

Literatürde çözeltilerin pH değerinin adsorpsiyon verimini belirleyen en kritik parametrelerden biri olduğu belirtilmektedir (Mamman vd., 2024). Sulu ortamlarda pH dalgalanmalarının hem biyolojik aktiviteyi hem de kimyasal süreçleri etkileyen düzenleyici bir rol oynadığı da ifade edilmektedir (Amrutha vd., 2023). pH'ın, arıtma ortamındaki  $H^+$  ve  $OH^-$  derişimlerini değiştirerek toksik kirleticilerin uzaklaştırılmasını önemli ölçüde etkilediği; ayrıca atık su kalitesinin değerlendirilmesinde temel bir gösterge olduğu belirtilmektedir. pH aynı zamanda adsorbanın yüzey yükünü ve yüzeyde gerçekleşen hidroliz reaksiyonlarını düzenleyerek adsorpsiyon mekanizmasını belirleyen başlıca faktörlerden biridir (Ashour vd., 2022).

#### 2.3.2. Adsorbat Konsantrasyonu

Adsorbatın başlangıç konsantrasyonu sürecin genel hızını ve kapasitesini belirleyen önemli bir parametredir (Yıldız, 2024). Başlangıçta adsorban yüzeyinde çok sayıda boş aktif bölgenin bulunması, hızlı ve yüksek oranda bir adsorpsiyon sağlar. Temas süresinin uzamasıyla birlikte, çözeltideki iyonlar için uygun adsorpsiyon alanlarının azalması ve iyonlar arasında ortaya çıkan itici kuvvetler nedeniyle adsorpsiyon hızı giderek yavaşlar ve süreç sonunda doygunluğa ulaşır (Amrutha vd., 2023).

### **2.3.3. Sıcaklık**

Sıcaklık, adsorpsiyonda önemli bir rol oynar ve genellikle giderim verimliliğini etkiler (Albatrni ve Qiblawey, 2024). Sıcaklığın adsorpsiyon süreci üzerindeki etkisi hem kinetik hem de termodinamik açıdan mekanizmanın işleyişini doğrudan belirlediği için oldukça kritik bir parametredir (Mamman vd., 2024). Adsorpsiyon sırasında gözlenen entalpi değişimleri, sürecin ekzotermik veya endotermik yapısından kaynaklanmaktadır (Acar ve Acar, 2022). Sıcaklık değişimi; çözünürlük, faz ayrımı, karışabilirlik ve adsorban parçacık boyutu gibi süreçte etkili birçok fizikokimyasal özelliği değiştirebilmektedir (Mamman vd., 2024).

### **2.3.4. Temas süresi**

Temas süresi, adsorbatın adsorban yüzeyiyle etkileşim süresini belirleyen önemli bir parametredir. Temas süresinin artması, sistemin dengeye yaklaşmasını sağlayarak adsorpsiyon kapasitesini ve giderim verimini artırır. Özellikle biyosorpsiyon süreçlerinde, kirleticilerin mikrobiyal hücre yüzeylerine bağlanması veya hücre duvarına nüfuzu daha uzun temas süreleriyle gerçekleşir. Ancak aşırı uzun temas süreleri, desorpsiyon veya bozunma gibi istenmeyen ikincil reaksiyonlara yol açabileceğinden kontrol edilmelidir (Sangoremi, 2025).

### **2.3.5. Adsorban dozu**

Adsorban miktarı, bir adsorpsiyon sisteminin performansını doğrudan etkileyen temel parametrelerden biridir (Amrutha vd., 2023). Maksimum verim ve etkin kullanım sağlanabilmesi için uygun adsorban dozunun belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Belirli bir başlangıç kirletici konsantrasyonunda kullanılan adsorban miktarı, sistemde mevcut aktif yüzey alanını ve adsorpsiyon bölgelerinin sayısını doğrudan etkilemektedir (Rápó & Tonk, 2021). Adsorban dozunun artırılması, daha fazla aktif bağlanma noktasının sisteme kazandırılmasına olanak sağladığından adsorpsiyon veriminde yükselmeye sebep olur (Amrutha vd., 2023; Rápó & Tonk, 2021).

### **2.3.6. Adsorbanın Yüzey Alanı ve Gözenek Yapısı**

Yüzey alanı, birçok adsorpsiyon çalışmasının optimize edilmesini sağlayan temel parametrelerden biridir. BET yöntemi, mikro ve mezogözenekli adsorbanların yüzey alanının belirlenmesinde en yaygın kullanılan yöntemdir (Cychosz ve Thommes, 2018).

Gözeneklilik derecesi yüksek olan katı maddeler, daha fazla adsorpsiyon kapasitesine sahiptir. Adsorbanın daha küçük parçalara ayrılmasıyla birlikte özgül yüzey alanı artar; bu

durum, adsorbatın bağlanabileceği yüzeylerin çoğalmasını sağlayarak adsorpsiyon sürecinin etkinliğini artırır (Adıyaman, 2023).

Adsorpsiyon kapasitesi ile partikül boyutu arasındaki ilişki, adsorbatın kimyasal özellikleri ile adsorbanın yapısal ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Partikül boyutunun küçülmesi, BET yüzey alanını artırarak adsorpsiyon performansını olumlu yönde etkilemektedir. Bu nedenle adsorban partikül boyutu, adsorpsiyon sistemlerinin tasarımında önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir (Rápó ve Tonk, 2021).

## **2.4. Adsorpsiyon İzotermi**

Adsorpsiyon süreçlerinde adsorban ile adsorbat arasındaki denge ilişkileri, belirli bir sıcaklıkta çözültüde kalan madde miktarı ile adsorpsiyona uğrayan madde miktarı arasındaki bağıntıyı ifade eden adsorpsiyon izotermi ile açıklanmaktadır (El-Khaiary, 2008). Adsorpsiyon izotermi, bir adsorbanın maksimum adsorpsiyon kapasitesini belirlemede ve adsorpsiyon süreçlerinin verimliliğini değerlendirmede önemli araçlar olup, deneysel verilerin bu modellere uygulanması adsorpsiyon mekanizması hakkında değerli bilgiler sağlar (Bakhtaoui vd., 2025). Bu izoterm, adsorpsiyon sistemlerinin tasarımında kritik öneme sahiptir ve izoterm sabitleri adsorbanın yüzey özellikleri ile kapasitesini yansıtır (El-Khaiary, 2008).

Adsorpsiyon izotermi seçimi, denge adsorpsiyon verilerinin incelenmesiyle başlayan aşamalı bir süreçtir. Önce deneysel verilerin eğri tipi değerlendirilerek adsorpsiyon mekanizması hakkında ön bilgi elde edilir. Ardından bu veriler farklı parametre sayısına sahip izoterm modellerine uygulanır ve sistemin davranışını en iyi açıklayan modeller karşılaştırılır. Son aşamada ise model parametrelerinin anlamlılığı, hata analizleri ve deneysel verilerle uyumu dikkate alınarak optimum izoterm modeli belirlenir (Al-Ghouti ve Da'ana, 2020).

### **2.4.1. Langmuir izotermi**

Langmuir adsorpsiyon izotermi, adsorpsiyonun benzer yüzey bölgelerinden tek katmanlı oluştuğunu ve adsorban yüzeyindeki tüm aktif bölgelerin enerji ve özellik olarak birbirine eşit olduğunu varsayan iki parametrelilik bir modeldir (Al-Ghouti ve Da'ana, 2020; Özmetin ve Kocakerim, 2018). Langmuir adsorpsiyon izotermine göre; yüzeye gelen moleküller sürekli olarak yüzeye çarpar (adsorpsiyon) ve yüzeyden ayrılır (desorpsiyon); denge durumunda ise iki hız eşittir. Model, yüzeyde yan yana adsorplanan moleküller arasında etkileşim olmadığını ve her adsorpsiyon bölgesinin yalnızca bir molekül tutabildiğini kabul

eder ve bunun sonucunda Langmuir modeli, özellikle homojen yüzeylerde ve tek tabaka adsorpsiyonda en iyi sonucu verir (Al-Ghouti ve Da'ana, 2020).

Langmuir izotermi aşağıdaki denklem (D.1) ile ifade edilir (Özmetin & Kocakerim, 2018):

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (D.1)$$

#### 2.4.2. Freundlich izotermi

Freundlich modeli, adsorpsiyonun heterojen ve çok katmanlı bir yüzey üzerinde gerçekleştiğini; bileşenlerin dağılımının, mevcut bağlanma bölgelerinin enerji özelliklerine ve zamana bağlı olduğunu ifade eder (Villabona-Ortiz vd., 2025). Adsorpsiyon ısısının ve afinitelerinin heterojen adsorban yüzeyinde homojen olarak dağılmadığını da açıklar (Khumalo vd., 2025). Freundlich izoterm modelinde, adsorban yüzeyindeki güçlü adsorpsiyon bölgelerinin adsorbat molekülleri tarafından önce işgal edildiği ve adsorpsiyon gücünün, bölge işgal derecesinin artmasıyla azaldığı yer alır (Admawi, 2025).

Freundlich izoterminin lineer temel denklemi (D.2) şöyledir (Quan vd., 2025):

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (D.2)$$

#### 2.4.3. Temkin izotermi

Temkin izotermi, adsorban–adsorbat etkileşimlerini dikkate alan ve çok düşük ve çok yüksek derişim bölgeleri göz ardı edilerek, adsorpsiyon tabakasındaki moleküllerin adsorpsiyon ısısının yüzey örtünmesi arttıkça logaritmik değil, doğrusal olarak azaldığını varsayan bir modeldir (Özmetin & Kocakerim, 2018). Bu yönüyle, adsorpsiyon ısısının logaritmik olarak azaldığını varsayan Freundlich modelinden farklıdır. Temkin modeli ayrıca adsorban–adsorbat etkileşimlerinin yüzey boyunca uniform olduğunu varsayar. Model aşağıdaki (D.3) denklemi ile tanımlanmaktadır (Sharma vd., 2016):

$$q_e = \left(\frac{RT}{b_T}\right) \ln a_T + \left(\frac{RT}{b_T}\right) \ln C_e \quad (D.3)$$

#### 2.4.4. Dubinin–Radushkevich İzotermi

Dubinin–Radushkevich izoterm modeli, adsorpsiyon sürecinin ortalama serbest enerji değerini tahmin eden ve adsorbanın gözeneklilik etkisini dikkate alan bir izoterm modelidir.

Özellikle mikro-gözenekli adsorbanlar için uygundur. Modelin lineer formu (D.4) şöyledir (Sharma vd., 2016):

$$\ln q_e = \ln q_{max} - K_d \epsilon^2 \quad (D.4)$$

Polanyi potansiyeli ( $\epsilon$ ) (D.5) denklemi ile hesaplanır (Al-Ghouti ve Da'ana, 2020):

$$\epsilon = RT \ln \left( 1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad (D.5)$$

## 2.5. Adsorpsiyon Kinetikleri

Adsorpsiyon kinetiği, adsorbat iyonlarının adsorban üzerine alınma hızını tanımlayan önemli bir fizikokimyasal parametredir ve sistemin dengeye ulaşma süresini belirler. Kinetik davranışın anlaşılması, adsorpsiyon proseslerinin tasarımı ve optimum işletme koşullarının seçimi için gereklidir. Adsorpsiyon hızı; film difüzyonu, gözenek içi difüzyon veya kimyasal reaksiyon gibi farklı mekanizmalar tarafından kontrol edilebilir (Dehghani vd., 2017). Kütle ortamında gerçekleşen difüzyon kontrollü süreçler oldukça hızlıdır. Bununla birlikte, kimyasal etkileşimlerin gerektirdiği aktivasyon enerjisi ile desorpsiyon, film difüzyonu ve parçacık içi difüzyon gibi süreçler, adsorpsiyon hızını önemli ölçüde düşürebilir (Bujdák, 2020).

Kinetik modellerin kullanılması, adsorpsiyon sürecinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlar ve arıtım süreçlerinin tasarım ve optimizasyonuna yardımcı olur (Albatrni ve Qiblawey, 2024). Adsorpsiyon kinetiğinin modellenmesinde ağırlıklı olarak YBD, YİD, Elovich modelleri kullanılır.

### 2.5.1. Yalancı Birinci Derece (YBD) Kinetik Model

YBD eşitliği, adsorpsiyon süreçlerine ait hız sabitinin belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır (Okumuş ve Doğan, 2019). Adsorpsiyon kinetiğinin modellenmesinde YBD modelinin lineerleştirilmiş formu denklemi aşağıdaki denklem (D.6) ile hesaplanır (Revellame vd., 2020).

$$\ln(q_e - q_t) = -k_1 t + \ln q_e \quad (D.6)$$

### 2.5.2. Yalancı İkinci Derece (YİD) Kinetik Model

YİD eşitliği, zamanla adsorpsiyon süreçlerinin kapasite değerlerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Adsorpsiyon kinetiğinin modellenmesi için aşağıdaki denklem (D.7) ile ifade edilir (Güneş, 2018).

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (D.7)$$

### 2.5.3. Elovich Kinetik Model

Elovich modeli, heterojen yüzeylerde gerçekleşen kemisorpsiyon süreçlerini açıklamak için kullanılan bir kinetik modeldir. Model, adsorpsiyon miktarı arttıkça adsorpsiyon hızının üstel olarak azaldığını varsayar. Bu nedenle yüzey enerjisinin değişken olduğu sistemlerde başarılı sonuçlar vermektedir (Isiuku,2023). Modelin doğrusal formu aşağıdaki denklem (D.9) ile ifade edilir (Sangoremi,2025).

$$q_t = \beta \ln(t) + \beta \ln(\alpha) t \quad (D.8)$$

### 2.6. Adsorpsiyon Sürecinin Termodinamik Değerlendirilmesi

Termodinamik analizler, atıksu arıtımında adsorpsiyon sürecinin uygulanabilirliğini ve adsorbanın endüstriyel ölçekte yeniden kullanılabilirliğini değerlendirmede önemli bir araçtır. Serbest enerji, entalpi ve entropi gibi parametreler, adsorpsiyonun kendiliğindenliğini, termal kararlılığını ve etkinliğini ortaya koymaktadır. Adsorpsiyon süreci sıcaklığa duyarlı olup, termodinamik incelemeler sürecin ekzotermik veya endotermik karakterini belirlemeye olanak tanımaktadır. Ayrıca, bu çalışmalar adsorbanın adsorbata karşı afinite ve seçiciliğini ortaya koyarak adsorban–adsorbat etkileşiminin anlaşılmasını sağlamaktadır (Girish, 2025).

$\Delta G^\circ$ (D.8) denklemiyle hesaplanır (Alaqrarbeh, 2021):

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (D.8)$$

$\Delta H^\circ$  ve  $\Delta S^\circ$  aşağıdaki denklem (D.9) kullanılarak  $\ln K_c - 1/T$  grafiğinin eğim ve kesişim noktalarından elde edilir (Adelodun vd., 2016):

$$\ln K_c = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (D.9)$$

$K_c$  ise izoterm parametrelerinden (D.10) ile hesaplanır (Jodeh vd., 2019):

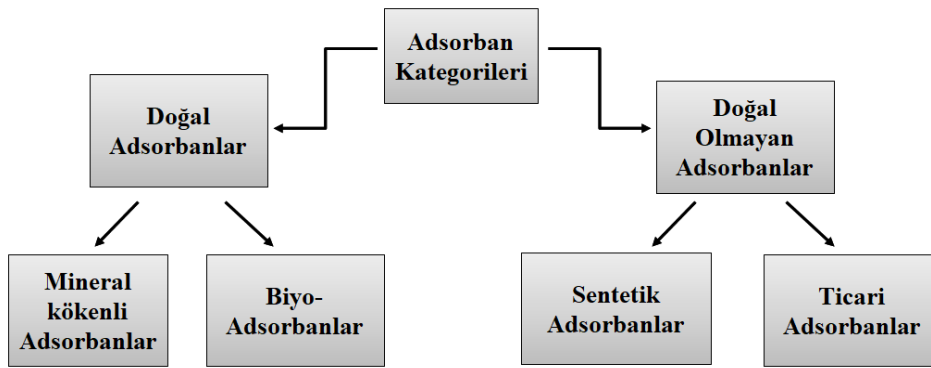
$$K_c = \frac{q_e}{C_e} \quad (D.10)$$

### 2.7. Adsorban Türleri ve Özellikleri

Adsorbanlar, adsorpsiyon sürecinin temel bileşenleri olup kirletici maddeleri yüzeylerinde tutabilen, gözenekli yapıya sahip ve suda çözünmeyen malzemelerdir. Adsorban

seçiminde maliyet ve fizikokimyasal özellikler dikkate alınmakta ve bu özellikler atıksularda elde edilecek giderim verimini doğrudan etkilemektedir. Etkili bir adsorbanın başlıca özellikleri arasında yüksek adsorpsiyon kapasitesi, kısa adsorpsiyon süresi ve geniş yüzey alanı sağlayan yüksek gözeneklilik yer almaktadır (Sukmana vd., 2021).

Kirlenmiş suların arıtımında yaygın olarak kullanılan adsorbanlar için; yer kabuğundan elde edilen mineraller ile biyolojik kökenli malzemeler doğal adsorbanlar, laboratuvar ortamında sentezlenen veya ticari olarak temin edilen malzemeler ise doğal olmayan adsorbanlar olarak sınıflandırılır (Yousef vd., 2020). Doğal adsorbanlar arasında kitosan, doğal zeolitler ve kil mineralleri, pirinç kabuğu yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal olmayan adsorbanlar kapsamında ise aktif karbonlar, iyon değiştirici reçineler, metal oksit nanoparçacıkları yaygın olarak kullanılmaktadır (Alyüz & Veli, 2005). Şekil 2.4 farklı adsorban kategorilerine genel bir bakış sunmaktadır (Yousef vd., 2020).



Şekil 2.5. Adsorban Türleri (Yousef vd., 2020).

### 2.7.1. Aktif karbonlar

Tarımsal ve biyokütle esaslı atıkların farklı aktivasyon teknikleri ve üretim koşulları altında işlenmesiyle elde edilen aktif karbonların, çevresel kirleticilerin uzaklaştırılmasında etkili bir adsorban alternatifi sunduğu literatürde vurgulanmaktadır (Gayathiri vd., 2022). Aktif karbonlar, organik veya inorganik kökenli hammaddelerin inert ortam varlığında, yüksek sıcaklıklarda, fiziksel veya kimyasal aktivasyon işlemleri uygulanarak elde edilen, yüksek özgül yüzey alanı ( $500\text{--}3000\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ ), gelişmiş mikrogözenek yapısı ve yüksek adsorpsiyon kapasitesi ile yaygın olarak kullanılan adsorbanlardır (Dilekoğlu ve Yapıcı, 2023; Siyal vd., 2025). Bununla birlikte, üretim süreçlerinde yüksek sıcaklıkların gerekli olması nedeniyle maliyetleri yüksektir. Aktif karbon üretiminde kullanılacak hammadde çeşitliliği oldukça geniştir (Siyal vd., 2025). Genellikle atık niteliği taşıyan organik veya

inorganik materyaller aktif karbon üretiminde tercih edilmektedir (Dilekoğlu ve Yapici, 2023).

Temel olarak aktif karbon üretimi için fiziksel ve kimyasal şeklinde iki yöntem bulunmaktadır (Malik vd., 2007). Fiziksel aktivasyon, genellikle karbonizasyonu takiben yüksek sıcaklıklarda ( $\geq 800$  °C) buhar, CO<sub>2</sub> veya benzeri gazlarla gerçekleştirilen iki aşamalı bir süreçtir. Süreç kontrolünün kolay ve temiz olması nedeniyle CO<sub>2</sub> sıklıkla tercih edilmektedir. Kimyasal aktivasyon ise; güçlü asit veya bazlar aktivatör olarak kullanılarak; hammaddenin kimyasal aktivasyon ajanları eşliğinde doğrudan karbonlaştırılması esasına dayanmaktadır (Gayathiri vd., 2022; Malik vd., 2007).

### **2.7.2. Biyosorbanlar**

*Biyosorpsiyon*, kirleticilerin biyokütle veya biyolojik kökenli materyaller tarafından iyon değişimi, kompleksleşme, adsorpsiyon, şelatlaşma ve mikro-çökeltme gibi fizikokimyasal mekanizmalar yoluyla, düşük maliyetli ve çevre dostu bir biçimde ortamdan uzaklaştırılmasını esas alan bir yöntemdir (Gouda ve Taha, 2023). Bu durum, birçok ekolojik ve çevresel problemin giderilmesine yardımcı olmakta ve bu şekilde biyosorpsiyon yönteminin düşük işletme ve üretim maliyeti ile yüksek giderim verimi gibi önemli avantajlara sahip olmasını sağlamaktadır (Elgarahy vd., 2021). Biyosorpsiyon performansı; kullanılan biyosorbanın türü, adsorbatın özellikleri ve proses parametreleri gibi faktörlere bağlı olarak değişmekte ve ekonomik uygulanabilirliği bu değişkenlerin ortak etkisiyle belirlenmektedir (Mamman vd., 2024).

Son yıllarda, tarımsal kaynaklardan elde edilen düşük maliyetli adsorbanların kullanıldığı biyosorpsiyon yöntemleri ve biyosorbanlar (kitin, kitosan, turba, maya, mantar ve bakteriyel biyokütle gibi) etkili doğal adsorbanlar olarak tercih edilmektedir (Alaqrarbeh, 2021; Mamman vd., 2024). Bu biyomalzemelerin yüzey özelliklerinin kimyasal modifikasyonlarla iyileştirilmesi, kirletici giderim performansını önemli ölçüde artırabilmektedir (Tunali Akar vd., 2016).

### **2.7.3. Metal oksit bazlı adsorbanlar**

Nano boyuttaki metal oksitler (örneğin;  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnO<sub>2</sub> ve  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) çevre dostu olup, yüksek yüzey alanı ve spesifik bağlanma eğilimleri göstermektedirler (İnce ve Kaplan İnce, 2017). Manganez, nikel, çinko, alüminyum, magnezyum, titanyum, zirkonyum ve demir oksitler yaklaşık 1–100 nm boyut aralığında bulunan metal oksit bazlı nanoparçacıklar arasında

yer almaktadır (Algarni ve Al-Mohaimed, 2022). Metal oksitler, Lewis asit-baz özellikleri gösterebilir ve Cd (II), Zn (II), Ni (II), Cu (II) ve Pb (II) gibi geçiş metalleri ile bağlanabilir. Nanoskobik boyutta yüzeyde yoğun olarak bulunan adsorpsiyon alanları sayesinde yüksek spesifik adsorpsiyon kapasitesi gösterirler (İnce ve Kaplan İnce, 2017).

#### **2.7.4. Zeolitler**

Zeolitler, yapısal ve fonksiyonel özellikleri sayesinde iyon değişimi yapabilen, kristal yapılı doğal alüminosilikat mineralleridir. Yüksek yüzey alanları, iyi iyon değişim kapasiteleri, ekonomik olmaları ve belirli ağır metallere karşı gösterdikleri seçicilik nedeniyle sulu ortamlardan metal iyonlarının gideriminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Alyüz & Veli, 2005).

### **2.8. Adsorpsiyonun Endüstriyel Önemi**

Adsorpsiyon, çevresel kirliliğin kontrolünde önemli bir role sahiptir. Bu tür süreçler; yüksek güvenilirlik, enerji verimliliği, tasarım esnekliği, teknolojik olgunluk ve doygunluğa ulaşmış adsorbanın yeniden rejenerasyonuna olanak sağlaması gibi avantajları nedeniyle ayırma ve saflaştırma işlemleri için uygun yöntemler arasında yer almaktadır (Salman, 2017).

Adsorpsiyon teknolojisi endüstride geniş bir kullanım alanına sahip olup; kirlilik kontrolü, kataliz, toprak bilimi, kromatografik analiz, biyolojik bilimler ile tıp ve farmakoloji gibi birçok alanda uygulanmaktadır (Salman, 2017). Ayrıca, güncel atıksu arıtma teknikleri arasında en geniş uygulama alanına sahip yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Waisi vd., 2025). Adsorbanlar, kirleticileri yüzeylerinde tutarak atık sudan uzaklaştırır. Endüstriyel atık sular; boyar maddeler, ilaç kalıntıları, pestisitler ve diğer organik/inorganik kirleticiler içerebilir. Her endüstri, atık suların uygun şekilde arıtılmasından ve bertaraf edilmesinden sorumludur (Hira vd., 2023). Ayrıca son yıllarda mikro kirleticiler gibi klasik yöntemlerle uzaklaştırılması güç bileşiklerin arıtımında da etkili bulunması, adsorpsiyonun sürdürülebilir arıtma stratejileri içindeki önemini artırmaktadır. Bu özellikleri sayesinde adsorpsiyon süreçleri, endüstriyel ölçekte su ve sanitasyon gereksinimlerini karşılayabilecek esneklik ve etkinlikte bir çözüm sunmaktadır (Waisi vd., 2025).

#### **2.8.1. Boyar maddeler ve adsorpsiyon**

Boyar maddeler, çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan karmaşık organik bileşiklerdir (Tunali Akar vd., 2016). Sulu çözeltilerde çözünen boyar maddeler renk, iyonik yapı ve fonksiyonel gruplarına göre sınıflandırılmaktadır. Boyar maddeler, iyonik ve iyonik olmayan olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. İyonik boyar madde, anyonik

(reaktif, direkt ve asidik) ile katyonik (bazik) olmak üzere iki ana grupta ele alınmaktadır. İyonik olmayan boyar maddeler ise vat ve dispersiyon boyar maddeler şeklinde sınıflandırılmaktadır (Sonawane vd., 2025). Tablo 2.1’de boya türlerinin özellikleri, kullanım alanları ve potansiyel toksisiteleri sunulmaktadır (El-habacha vd., 2023).

**Tablo2.1.** Boyar Maddelerin Sınıfları, Endüstriyel Kullanım Alanları ve Sağlık Etkileri (El-habacha vd., 2023).

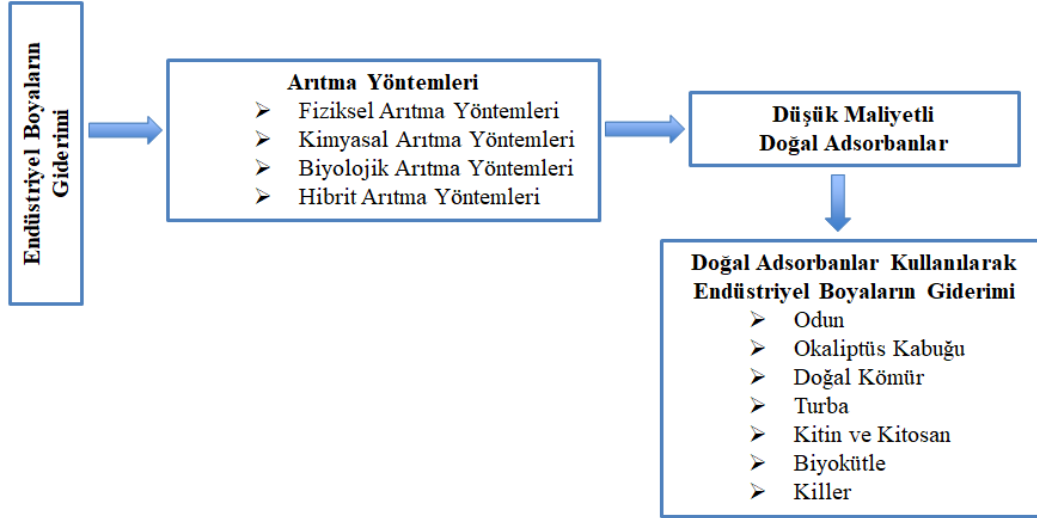
Boya Türü		Endüstriyel Uygulamalar	Sağlık Etkileri	Örnekler
İyonik boyar maddeler	Anyonik (Reaktif, Direkt ve Asidik)	Baskı, Kâğıt, Deri, Modifiye Akrilik, Gıda, Kozmetik, Pamuk, Yün, Naylon	Cilt ve mukozada tahriş ve yanıklar, Alerjik solunum problemleri, Mesane kanseri riski	Acid Blue 25; Acid Red 57; Methyl Orange; Congo Red
	Katyonik (Bazik)	Modifiye Polyesterler, Tıbbi Uygulamalar, Naylonlar, Katyonik Boyalar, Kâğıt, Poliakrilonitril	Kanserojen Etki, Alerjik Reaksiyonlar, Cilt Tahrişi, Mutasyonlar	Methylene Blue; Basic Red 46; Malachite Green
İyonik olmayan boyar maddeler	Vat	Selülozik lifler, pamuk, rayon,	Şiddetli yanıklar, Cilt ve mukoza tahrişi	Indigo; Green Bin 6; Blue Bin
	Dispers	Naylon, polyester, selüloz, akrilik lifler	DNA hasarı, Mesane kanseri, Dalak sarkomları	Dispersed Yellow; Dispersed Blue; Dispersed Orange; Dispersed Red

Endüstriyel boyama süreçleri sırasında kullanılan boyar maddelerin önemli bir kısmı atık suya karışmakta olup, yaklaşık %10–15’inin alıcı su ortamlarına ulaştığı bildirilmektedir (Romero vd., 2025). Özellikle tekstil, kâğıt, baskı ve plastik endüstrilerinde yoğun su kullanımı nedeniyle boya içeren atık sular oluşmakta olup, bu atık suların toksik ve mutajenik özellikleri ciddi çevresel riskler oluşturmaktadır (Tunali Akar vd., 2016). Bu nedenle, boyar maddelerin atık sulardan etkin bir şekilde giderilmesi uzun vadeli ekolojik zararların önlenmesi ve çevresel dengenin korunması açısından büyük önem taşımaktadır (Romero vd., 2025).

Sularda bulunan boyar maddelerin olumsuz etkilerinin azaltılması ve giderilmesi amacıyla adsorpsiyon, nanofiltrasyon, biyolojik arıtma ve ileri oksidasyon prosesleri gibi çeşitli yöntemler uygulanmaktadır (Romero vd., 2025). Adsorpsiyon, çeşitli boyar maddeleri uzaklaştırma, yüksek kaliteli arıtılmış su elde etme ve işletme prosedürlerini basitleştirme

avantajları nedeniyle önemli bir prosestir (Li vd., 2016). Uygulanabilirliğinin kolay olması, düşük maliyeti, işletme ve bakım gereksinimlerinin sınırlı olması ve yüksek verimi nedeniyle boyar madde gideriminde en etkili ve tercih edilen yaklaşımlardan biri olarak öne çıkmaktadır (Kassa vd.,2025; Romero vd., 2025).

Şekil 2.5' te boya gideriminde kullanılan düşük maliyetli adsorbanlar yer almaktadır (Kassa vd.,2025).



Şekil 2.5. Boya Gideriminde Kullanılan Düşük Maliyetli Adsorbanlar (Kassa vd.,2025).

### 3. KURAMSAL TEMELLER

Saadi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, sulu ortamlardan Rodamin B giderimi için meşe palamutunun kabuğundan elde edilen bir biyosorban hazırlanmış ve karakterize edilmiştir. FTIR, SEM-EDX, BET, TGA, XRD ve  $pH_{pzc}$  analizleri, adsorpsiyonu destekleyen fonksiyonel gruplar ile gözenekli yapının varlığını doğrulamıştır. Kesikli adsorpsiyon deneyleri, giderim performansının pH, temas süresi ve boya konsantrasyonuna güçlü biçimde bağlı olduğunu ve asidik koşullarda optimum giderimin sağlandığını göstermiştir. Adsorpsiyon davranışı Langmuir–Freundlich izoterm modeliyle en iyi şekilde açıklanmış, kinetik veriler ise YİD kinetik modele uyum göstererek kimyasal adsorpsiyonun baskın olduğunu ortaya koymuştur. Termodinamik analizler sürecin uygulanabilir, kendiliğinden gerçekleşen ve endotermik karakterde olduğunu göstermiştir. Ayrıca biyosorbanın,  $160.809 \text{ mg g}^{-1}$  maksimum adsorpsiyon kapasitesi ile birlikte çoklu rejenerasyon çevrimleri sonrasında da yüksek giderim performansını koruduğu rapor edilmiştir. Elde edilen bulgular, meşe palamudu kabuğunun atık su arıtımında kullanılabilir düşük maliyetli, çevre dostu ve sürdürülebilir bir biyosorban olduğunu ortaya koymuştur (Saadi vd., 2025).

Sayar yaptığı çalışmada, hiçbir kimyasal veya fiziksel ön işleme tabi tutulmayan susam küspesinin Metil Oranj boyar maddesinin sulu çözeltilerden gideriminde adsorban olarak kullanımını araştırmıştır. Adsorpsiyon sürecinde sıcaklık, pH ve adsorban miktarının etkileri Box–Behnken deney tasarımı kullanılarak incelenmiş ve Yanıt Yüzey Metodolojisi ile analiz edilmiştir. Parametrik değerlendirmeler, pH ve adsorban miktarının giderim verimi üzerinde etkili değişkenler olduğunu, özellikle pH 9 ve yüksek adsorban dozajlarında giderimin önemli ölçüde arttığını göstermiştir. İstatistiksel analizler, ikinci dereceden modelin deneysel verilerle yüksek uyum gösterdiğini ve modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ortaya koymuştur. En yüksek giderim verimi %98,68 olarak pH 9, 30 °C ve 6 g/100 mL koşullarında elde edilirken, enerji ve hammadde verimliliği dikkate alınarak pH 9, 20 °C ve 4 g/100 mL koşulları (%95,21 giderim) optimum olarak belirlenmiştir. İzoterm modellemesi sonuçları, adsorpsiyonun heterojen yüzeylerde ve çok katmanlı olarak gerçekleştiğini gösteren Freundlich modeliyle en iyi uyumu sağlamış, kinetik analizler ise sürecin YİD kinetik modele uyduğunu ve kimyasal adsorpsiyon mekanizmasının baskın olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, susam küspesinin düşük maliyetli, çevre dostu ve endüstriyel atıksuların arıtımında yeniden kullanılabilir bir adsorban olduğunu göstermiştir (Sayar, 2025).

El-Azazy ve arkadaşlarının çalışmasında, kirletilmiş sulardan Metilen Mavisi giderimi yeşil çay atığı kullanılarak adsorpsiyon yöntemiyle incelenmiştir. Ham ve ısıtılmış işlem görmüş adsorbanlar için pH, adsorban dozu, boya derişimi ve temas süresinin etkisi araştırılmış; ham ve 500 °C'de ısıtılmış işlem görmüş örneklerle sırasıyla %96,58 ve %98,07 Metilen Mavisinin giderimi sağlanmıştır. FTIR ve Raman analizleri adsorban yüzeylerinde çeşitli fonksiyonel grupların varlığını göstermiş; BET sonuçları ham örneğin mezo-makrogözenekli, ısıtılmış işlem görmüş örneklerin ise ağırlıklı olarak mikrogözenekli yapıya sahip olduğunu ortaya koymuştur. Denge verileri her iki adsorban için Freundlich izotermiyle uyumlu bulunmuş; maksimum adsorpsiyon kapasitesi ham ve ısıtılmış işlem görmüş örnekler için sırasıyla 68,28 ve 69,01 mg/g olarak belirlenmiştir. D-R izotermi, adsorpsiyonun ham adsorban üzerinde kemisorpsiyon, ısıtılmış işlem görmüş adsorban üzerinde ise fizisorpsiyonla gerçekleştiğini; kinetik analizler ise sürecin her iki adsorban için YİD modele uyduğu gözlemlenmiştir (El-Azazy vd., 2021).

Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, kahve posası, kenevir sapı ve makadamy kabukları gibi biyokütlelerden fosforik asit aktivasyonu ve piroliz ile hazırlanan aktif karbonlar kullanılarak, katyonik Metilen Mavisi ve anyonik Metil Oranj boyar maddelerinin adsorpsiyon performansı incelenmiştir. Adsorpsiyon, YİD kinetik modele ve Langmuir izotermine uyum göstermiştir. En yüksek adsorpsiyon kapasitesi Metilen Mavisi için makadamy kabuklarında (45,25 mg/g), Metil Oranj için ise kenevir sapında (38,45 mg/g) gözlemlenmiştir. Metilen Mavisi adsorpsiyonu elektrostatik çekim ve  $\pi$ - $\pi$  etkileşimleri ile, Metil Oranj adsorpsiyonu ise gözenek doluluğu ve hidrojen bağları ile gerçekleşmiştir. Öncü malzeme tipi gözenek yapısını ve yüzey kimyasını etkilemiş; kahve posası mikrogözenek, kenevir sapı mezogözenek, makadamy kabukları ise benzersiz gözenek dağılımı göstermiştir. Fosforik asit aktivasyonu gözenekleri genişletmiş, oksijen ve azot içeren fonksiyonel gruplar kazandırmış, piroliz sıcaklığı ve kül içeriği yüzey potansiyelini etkilemiştir. Bu sonuçlar, biyokütle atıklarının etkili karbon adsorbanlara dönüştürülebileceğini ve öncü seçiminin boyaya özgü adsorpsiyon mekanizmalarını belirlediğini gösterilmiştir (Wang vd., 2025b).

Hamadi ve arkadaşları, çevre dostu ve ekonomik bir adsorban kullanılarak dirençli farmasötik kirleticilerden hidrosiklorokin sulu ortamlardan uzaklaştırılmasını araştırmıştır. Tarımsal bir atık olan *Scolymus hispanicus*'tan elde edilen aktif karbonun karakterizasyonu BET, SEM ve XRD analizleriyle gerçekleştirilmiş; adsorbanın 258,13 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> özgül yüzey alanına sahip, mezogözenekli bir yapı sergilediği ve bu özelliklerin hidrosiklorokin adsorpsiyonunu desteklediği belirlenmiştir. Adsorpsiyon veriminin asidik ortamda (pH 3,5) maksimum %83,45'e ulaştığı, adsorban dozunun 0,75 g'a kadar artırılmasının giderimi

iyileştirdiği; buna karşın yüksek başlangıç hidrosiklorokin derişimlerinde aktif yüzeylerin doygunluğu nedeniyle verimin azaldığı tespit edilmiştir. İzoterm çalışmaları Langmuir modelinin en iyi uyumu sağladığını ve maksimum adsorpsiyon kapasitesinin 23,15 mg g<sup>-1</sup> olduğunu göstermiştir. Kinetik ve termodinamik değerlendirmeler, sürecin YİD kinetik modele uyduğunu ve kendiliğinden gerçekleşen, elverişli ve endotermik bir adsorpsiyon mekanizmasıyla ilerlediğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, *Scolymus hispanicus* kökenli aktif karbonun ileri su arıtımında hidrosiklorokinin giderimi için etkili ve umut verici bir biyosorbent olduğu değerlendirilmiştir (Hamadi vd., 2026).

Şencan ve Çiftçi Yavuzarslan yaptıkları çalışmada, nar suyu üretiminden çıkan tarımsal bir atık olan nar kabuğundan fiziksel ve kimyasal aktivasyon yöntemleri kullanılarak aktif karbon üretmiş ve elde edilen aktif karbonun elma suyundaki carbendazim pestisitinin giderimindeki adsorpsiyon performansını incelemişlerdir. Kimyasal aktivasyon ZnCl<sub>2</sub> ve AlCl<sub>3</sub> kullanılarak gerçekleştirilmiş, en yüksek yüzey alanı ve adsorpsiyon kapasitesi ZnCl<sub>2</sub> ile aktive edilen aktif karbonda elde edilmiştir. BET ve FT-IR analizleri, aktif karbon yüzeyinde adsorpsiyon için uygun fonksiyonel grupların ve gelişmiş gözenek yapısının oluştuğunu göstermiştir. Adsorpsiyon deneyleri sonucunda, artan aktif karbon miktarı ile pestisit gideriminin %90'a kadar ulaştığı ve karıştırma süresinin adsorpsiyon üzerinde sınırlı etkisi olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, nar kabuğunun düşük maliyetli ve çevre dostu bir hammadde olarak pestisit gideriminde etkili bir aktif karbon kaynağı olabileceğini ortaya koymuştur (Şencan ve Çiftçi Yavuzarslan, 2022).

Aslan yaptığı çalışmada, çörek otundan yağ ekstraksiyonu sonrası oluşan tarımsal atık posasını, ZnCl<sub>2</sub> ile kimyasal aktivasyon yöntemini kullanarak, aktif karbon üretiminde değerlendirmiştir. 500 °C'de gerçekleştirilen aktivasyon sonucunda, 1:1 ve 2:1 emdirme oranlarında elde edilen aktif karbonların BET yüzey alanları sırasıyla 505.073 m<sup>2</sup>/g ve 276.563 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Yapısal ve yüzey özellikleri BET, FTIR, XRD ve pH<sub>pzc</sub> analizleriyle karakterize edilen aktif karbonların mikro ve mezo gözenekli yapıya sahip olduğu ve asidik yüzey karakteri gösterdiği rapor edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çörek otu posasının düşük maliyetli ve çevre dostu bir aktif karbon öncül maddesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Aslan, 2021).

Ahmed ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, ön işlem görmüş atık çilek çanak yaprağını Ni (II) iyonlarının adsorpsiyonu için kullanmış ve giderim %45 olarak bulmuştur. Malzeme HCl ile işlendikten sonra performansı önemli ölçüde artmış ve optimum koşullarda

(pH 8, adsorban dozu 70 mg, Ni (II) konsantrasyonu 50 mg L<sup>-1</sup>, karıştırma hızı 100 rpm, karıştırma süresi 95 dakika, sıcaklık 25 °C) giderim %98,5'e ulaşmıştır. HCl ile işlenen adsorban, alkol ve karboksilik asit gruplarındaki –OH fonksiyonel grupları sayesinde yüksek performans göstermiştir. Adsorban 10 kez geri dönüştürülmüş ve kapasitesinde yalnızca %1–5 kayıp gözlenmiştir. Adsorpsiyon, polar fonksiyonel grupların varlığı nedeniyle pH duyarlı olarak gerçekleşmiş ve bazik ortamda kemisorpsiyon veya iyon değişimi mekanizması ile meydana gelmiştir. Çok değişkenli optimizasyon merkezi bileşen tasarım modeli ile yapılmış; adsorban dozu ve karıştırma süresi hariç tüm etkiler için  $P \leq 0,05$  bulunmuş, Langmuir ve D–R izoterm modelleri ile veriler uyum göstermiştir ( $R^2 = 0,995$  ve  $0,989$ ). Bu bulgular, HCl ile işlenmiş çilek sapı atığının, Ni (II) iyonlarının gideriminde hem yüksek verimli hem de tekrar kullanılabilir bir adsorban olduğunu göstermiştir (Ahmed vd., 2020).

Liu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, çilek yaprağı tozunun holoselüloz, lignin ve protein esaslı gözenekli bir yapıya sahip olduğu, yüzeydeki hidroksil, fenolik ve karboksilik fonksiyonel grupların amonyum adsorpsiyonunda aktif rol oynadığı FTIR analizleriyle ortaya konmuştur. Denge verilerinin Langmuir ve Freundlich izoterm modelleriyle uyumlu olduğu ve Langmuir modeline göre maksimum adsorpsiyon kapasitesinin 15, 25 ve 35 °C'de sırasıyla 3.93, 6.05 ve 7.66 mg/g olduğu, bu değerlerin mineral esaslı adsorbanlarla karşılaştırılabilir düzeyde olduğu bildirilmiştir. Sıcaklık artışıyla adsorpsiyon kapasitesinin yükselmesi, sürecin endotermik karakterini göstermektedir. Kinetik incelemeler, adsorpsiyonun çok basamaklı bir mekanizma izlediğini, hız kontrol basamağının partikül içi difüzyon olduğunu ve sürecin YİD kinetik modele uyum sağladığını ortaya koymuştur. Optimum pH aralığının 5–8 olduğu, yaygın birlikte bulunan iyonların adsorpsiyon üzerinde anlamlı bir etkisinin bulunmadığı, ancak Zn<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> ile karbonat ve fosfat iyonlarının pH değişimi nedeniyle adsorpsiyonu olumsuz etkilediği rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, çilek yaprağı tozunun geniş pH aralığında kararlı performans sergileyen ve mineral adsorbanlara alternatif olabilecek bir biyosorban olduğunu göstermiştir (Liu vd., 2010b).

## 4. MATERYAL VE METOD

### 4.1. Malzeme Hazırlığı ve Karakterizasyon

Çilek sapları sırasıyla yıkanmış, kurutulmuş ve öğütülmüştür. Öğütülmüş saplar kül fırınına alınmış ve 90 dakika boyunca 200 °C’de ısıl işlem uygulanmıştır. Örnekler  $\frac{3}{4}$  oranında  $K_2CO_3$  içeren çözelti içerisinde 48 saat boyunca bekletilmiş ve daha sonra etüvde bir gece kurutulmuştur. Ardından, 5 °C/dk ısı artış hızıyla 700 °C’de 90 dakika boyunca  $N_2$  varlığında tutulmuştur. İşlem tamamlandıktan sonra örnekler, pH 6–7 aralığına ulaşmaya kadar distile su ile yıkanmış ve daha sonra etüvde 1 gün kurularak kullanılmaya hazır hale getirilmiştir.

Hazırlanan çilek sapı bazlı adsorbanın aktif grupları FTIR ve elementel bileşimi elementel analiz ile incelenmiştir. Adsorbanın yüzey özellikleri BET ve SEM/EDX analizi ile araştırılmıştır. Adsorbanın sıcaklığa bağlı bozunma durumu TGA analizi ile takip edilirken; XRD analizi adsorbanın kristal yapısını belirlemek için kullanılmıştır.

Adsorbanın pH değişimlerinde adsorpsiyon durumunun anlaşılabilmesi için  $pH_{pzc}$  belirlenmiştir. Bunun için 10 mL 0.01 M NaCl içeren ve pH’ ları 2, 4, 6, 8, 10 ve 12 olan çözeltiler hazırlanmıştır. Bu çözeltilerin her birine hazırlanan adsorbandan 0.02 g eklenip 24 saat çalkalanmaya bırakılmıştır. Daha sonra tekrar pH değerleri ölçülmüş ve  $pH_{pzc}$ ’nı gösteren grafik düzenlenmiştir.

### 4.2. Adsorpsiyon Deneyleri

Adsorpsiyon sürecine etki eden farklı parametrelerin adsorpsiyon verimi ve kapasitesi üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla aşağıda belirtilen deneysel koşullar sistematik olarak sırasıyla incelenmiştir:

**Başlangıç boya konsantrasyonunun etkisi:** Adsorpsiyon performansının boya konsantrasyonuna bağlı değişimini incelemek amacıyla, başlangıç konsantrasyonu 10, 20, 30, 40 ve 50 ppm olarak değişen çözeltiler hazırlanmıştır. Bu deneyler 120 dakika boyunca 200 rpm su banyosu çalkalama hızı ve oda sıcaklığında, 2 g/L adsorban dozajı ile yürütülmüştür.

**pH etkisi:** Çözeltinin pH değerinin adsorpsiyon üzerine etkisini belirlemek amacıyla deneyler pH 2, 4, 6, 8, 10 ve 12 için gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 200 rpm çalkalama hızı ve oda sıcaklığı için deney süresi 120 dakika olarak belirlenmiş ve 40 ppm boya konsantrasyonunda 2 g/L adsorban dozajı ile deneyler gerçekleştirilmiştir.

**Çalkalama hızının etkisi:** Çalkalama hızının adsorpsiyon süreci üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, çalkalama hızı 170, 185 ve 200 rpm şeklinde değiştirilmiştir. Bu deneyler oda sıcaklığında 120 dakika, pH 2, 40 ppm başlangıç konsantrasyonu, 2 g/L adsorban dozajı koşullarında yapılmıştır.

**Sıcaklık etkisi:** Adsorpsiyonun sıcaklığa bağlı davranışını incelemek amacıyla 25, 30 ve 35 °C sıcaklıklarda deneyler yürütülmüştür. Bu deneyler 120 dakika boyunca 185 rpm çalkalama hızında, pH 2, 40 ppm boya konsantrasyonu, 2 g/L adsorban dozajı için sürdürülmüştür.

**Adsorban dozajının etkisi:** Adsorban miktarının adsorpsiyon verimine olan etkisini ortaya koymak amacıyla, 2, 3, 4, 5 ve 6 g/L adsorban dozajı için çalışmalar yapılmıştır. 25 °C sıcaklık, pH 2, 40 ppm başlangıç konsantrasyonu ve 185 rpm çalkalama hızı diğer koşullar olarak belirlenmiştir.

**Temas süresinin etkisi:** Adsorpsiyon dengesine ulaşma süresinin belirlenmesi amacıyla, 25 °C' de, pH 2, 2 g/L adsorban dozajı, 40 ppm boya konsantrasyonu, 185 rpm çalkalama hızı koşullarında zamanla sistem izlenmiştir.

Adsorpsiyon kapasitesi ve giderim verimlerinin belirlenmesi amacıyla, çözeltilerde kalan boya konsantrasyonları UV/Vis spektrofotometresi kullanılarak analiz edilmiştir. Adsorpsiyon deneyleri süresince belirli zaman aralıklarında alınan numuneler, 465 nm dalga boyunda analiz edilerek absorbans değerleri ölçülmüş ve kalibrasyon eğrileri yardımıyla boya konsantrasyonları hesaplanmıştır. Bu yöntem sayesinde adsorpsiyon sürecinin zamana bağlı değişimi ve denge koşulları güvenilir bir şekilde izlenmiştir. İlgili formüller aşağıda sunulmuştur:

*Adsorpsiyon kapasitesi* ( $q_e$ ), birim kütle adsorban başına tutulan adsorbat miktarını ifade etmekte olup aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır (Ergüt ve Özer, 2024):

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (D.13)$$

*Adsorpsiyon yüzdesi*, başlangıç konsantrasyonuna göre çözeltiden uzaklaştırılan boya miktarını ifade etmekte olup aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır (Ergüt ve Özer, 2024):

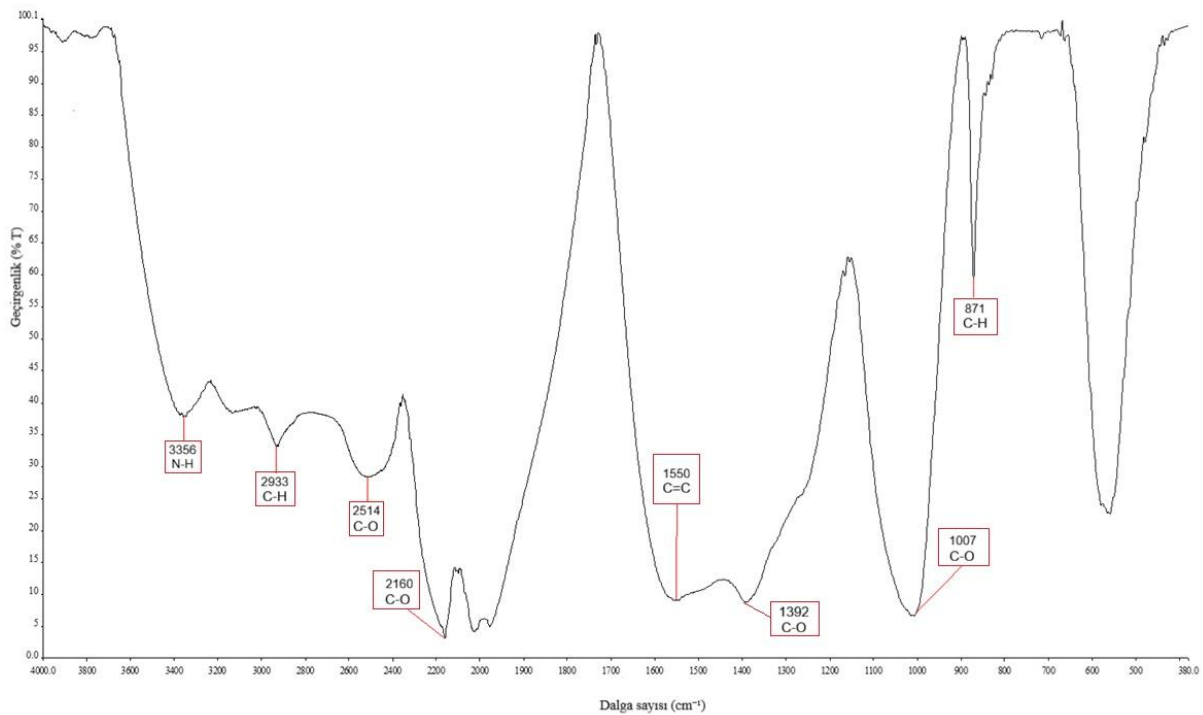
$$\% \text{ Adsorpsiyon} = \frac{(C_0 - C_e) \times 100}{C_0} \quad (\text{D.14})$$

Adsorpsiyon sürecinin kinetik çalışmaları, adsorpsiyon hızını ve mekanizmasını açıklamak amacıyla yaygın olarak kullanılan YBD ve YİD kinetik modeller yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Adsorpsiyon denge davranışının incelenmesi amacıyla ise Langmuir ve Freundlich izoterm modelleri kullanılmıştır. Bu modeller sayesinde adsorbanın maksimum adsorpsiyon kapasitesi ve yüzey özellikleri değerlendirilmiştir. Termodinamik çalışmalar ise adsorpsiyon sürecinin kendiliğindenliğini, ısı değişimini ve düzensizlik derecesini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiş; bu kapsamda  $\Delta G^\circ$ ,  $\Delta H^\circ$  ve  $\Delta S^\circ$  hesaplanmıştır.

## 5. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 5.1. Adsorbanın Karakterizasyonu

4000–400  $\text{cm}^{-1}$  dalga sayısı için yapılan FTIR analizi sonucunda elde edilen spektrum Şekil 5.1’de görülmektedir. Spektrumda gözlenen karakteristik pikler, adsorban yüzeyinde bulunan fonksiyonel grupların tanımlanmasına olanak sağlamıştır. FTIR analiz sonuçları, adsorban yüzeyinde N-H, C-H, C-O ve benzeri fonksiyonel grupların varlığına işaret etmekte olup, bu grupların özellikle boya molekülleri ile etkileşimde önemli rol oynadığı yorumlanmıştır.



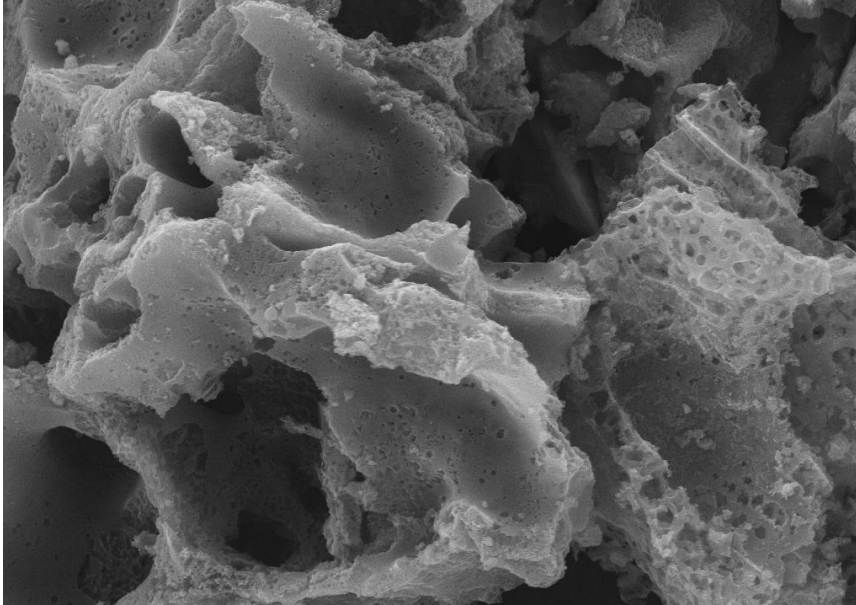
Şekil 5.1. FTIR analizi

Adsorbanın elementel analiz sonuçlarına göre; % 48.400 C ve % 4.519 H bulunduğu tespit edilmiştir. C oranının yüksek olması, malzemenin karbon esaslı bir yapıya sahip olduğunu ve adsorpsiyon uygulamaları için uygun bir altyapı sunduğunu göstermektedir. H içeriği ise malzeme bünyesinde hidrojen bağlarının oluşumuna olanak sağlayabilecek fonksiyonel grupların varlığına işaret etmektedir.

BET analizi için adsorban, yüzeyde adsorbe olmuş nem ve gazların uzaklaştırılması amacıyla 300 °C sıcaklıkta 12 saat boyunca degaz işlemine tabi tutulmuştur. BET analizi ile BET yüzey alanı, gözenek hacmi ve ortalama gözenek boyutu değerleri belirlenmiştir. Buna göre; adsorbanın 592.236  $\text{m}^2/\text{g}$  BET yüzey alanı, 0.146  $\text{cm}^3/\text{g}$  gözenek hacmi ve 58.785 Å

gözenek boyutuna sahip olduğu bulunmuştur. Yüksek yüzey alanı ve uygun gözenek hacmi, adsorpsiyon süreçlerinde aktif bölge sayısının fazla olmasını sağlayarak malzemenin adsorpsiyon performansını olumlu yönde etkilemektedir (Raganati vd.,2021). Ortalama gözenek boyutu değerine bakıldığında, malzemenin mezogözenekli bir yapıya sahip olduğu söylenebilir; bu durum özellikle boyar maddelerin adsorpsiyonu açısından avantaj sağlamaktadır (Mopoung vd.,2015).

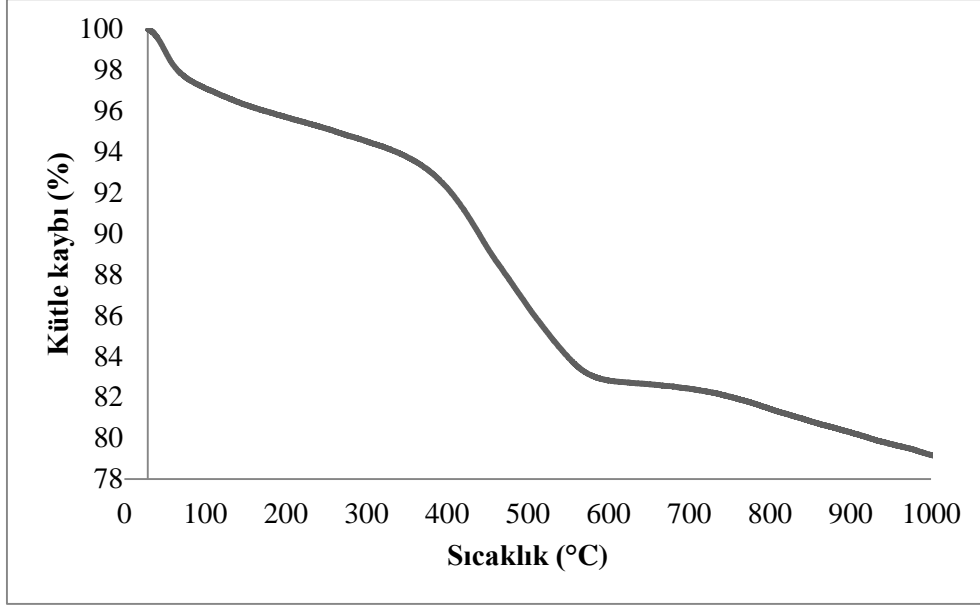
Şekil 5.2’de verilen SEM görüntüsü (15.00 kV, 4.00 KX), adsorban yüzeyinin düzensiz, farklı boyutlarda gözenekler içeren bir morfolojiye sahip olduğunu göstermektedir. Yüzeyde gözlemlenen boşluklar ve mikro/mezogözenekler (Mopoung vd.,2015), adsorbat moleküllerinin yüzeye tutunmasını kolaylaştırarak adsorpsiyon kapasitesini artırmaktadır. SEM analizi sonuçları, BET analizi ile elde edilen gözenekli yapı bulgularını destekler niteliktedir.



Şekil 5.2. SEM görüntüsü

EDX analizi sonuçları, hazırlanan adsorbanın ağırlıkça %70,11 C içeriğinin yanı sıra, %27,70 oranında O, %1,5 K ve %0,7 Mg içeren fonksiyonel gruplarının bulunduğunu göstermektedir. EDX sonucu karbon içeriğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca yüzeyde oksijen içeren fonksiyonel grupların bulunması adsorpsiyon sırasında adsorbat molekülleri ile elektrostatik etkileşimler ve hidrojen bağlarının oluşabileceğini göstermektedir (Akbari, 2019).

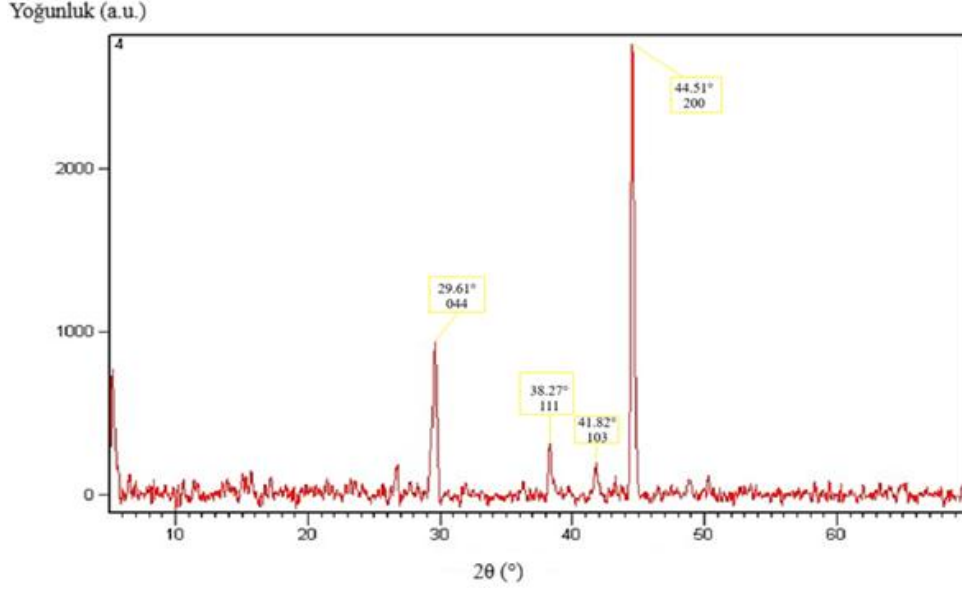
Adsorban malzemeye ait TGA eğrisi Şekil 5.3.’te sunulmuştur. TGA ölçümleri, azot varlığında 30–1000 °C için 10 °C/dakika sabit ısıtma hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.3. TGA Grafiği

Şekil 5.3 incelendiğinde, sıcaklık arttıkça malzemenin kütlesinde kademeli azalmalar meydana geldiği görülmektedir. İlk kütle kaybı, düşük sıcaklık aralığında gerçekleşmiş olup, malzeme yapısında bulunan ve fiziksel olarak bağlı olan su moleküllerinin uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Bu aşama, numunenin kuruma sürecini temsil etmektedir. İkinci kütle kaybı bölgesi, daha yüksek sıcaklıklarda gözlenmiş olup, biyokütle yapısının temel bileşenlerinden olan hemiselüloz ve selülozun termal bozunması ile ilişkilendirilmektedir. Bu aşamada meydana gelen kütle kaybı, polisakkarit yapıların parçalanmasına bağlı olarak uçucu bileşiklerin açığa çıkmasıyla açıklanabilir. Üçüncü ve daha geniş sıcaklık aralığında gerçekleşen kütle kaybı ise, biyokütle esaslı malzemelerde daha karmaşık bir yapıya sahip olan ligninin bozunmasına karşılık gelmektedir. Lignin, yüksek sıcaklıklarda geniş bir sıcaklık (300-400 °C) aralığında bozunduğu için, bu aşamada gözlenen kütle kaybı genellikle daha yavaş ve süreklidir (Yaradoddi, J. S.,2022) Elde edilen TGA sonuçları, literatürde rapor edilen benzer biyokütle bazlı adsorban ile uyum göstermektedir (Castro vd., 2021). Sonuç olarak, TGA analizi ile elde edilen bulgular, adsorbanın belirli bir sıcaklık aralığına kadar termal olarak kararlı olduğunu ve yüksek sıcaklıklarda yapısal bozunmaların meydana geldiğini ortaya koymuştur. Bu durum, malzemenin adsorpsiyon uygulamalarında tercih edilen sıcaklık aralıklarında güvenle kullanılabilceğini göstermektedir.

Adsorbanın kristal yapısını ve faz bileşimini belirlemek amacıyla yapılan XRD analizi ( $2\theta = 5-70^\circ$  ve  $5^\circ/\text{dakika}$  tarama hızı) ile Şekil 5.4'te sunulan XRD deseni elde edilmiştir.

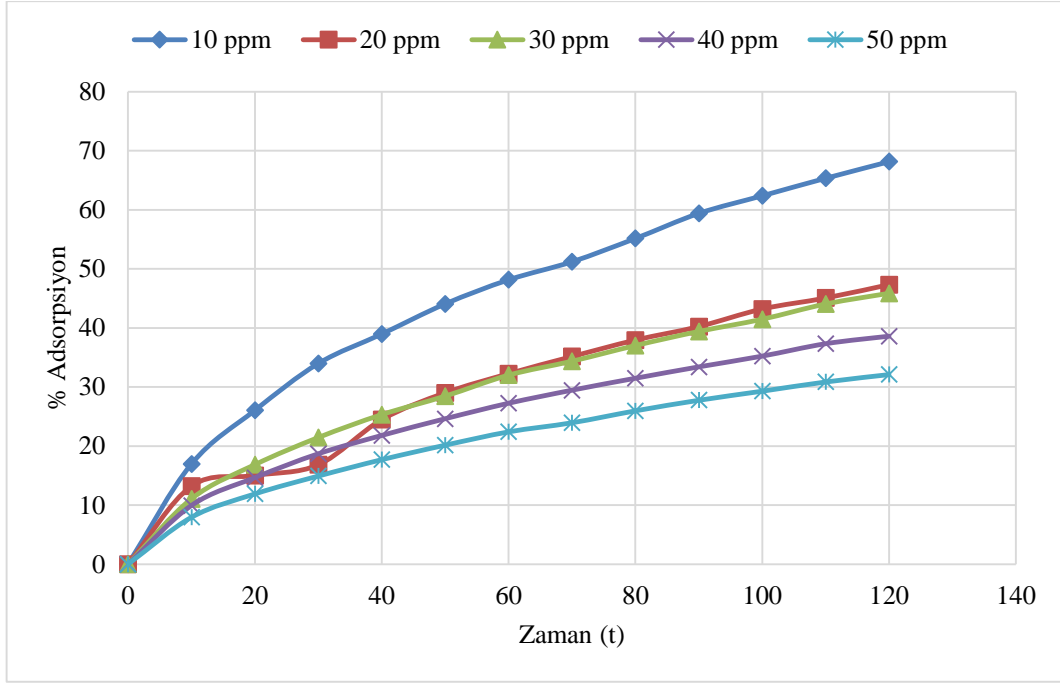


Şekil 5.4. XRD deseni

XRD deseninde bazı  $2\theta$  değerlerinde dikkat çeken belirgin pikler ve kırınım düzlemleri, literatürde bildirilen benzer biyokütle esaslı ve karbon türevli adsorbanlarla uyumlu şekilde,  $29.61^\circ(044)$  (Habibi vd., 2025),  $38.27^\circ(111)$  (Shilpa vd., 2025),  $41.82^\circ(103)$  (Roy vd., 2023) ve  $44.51^\circ(200)$  (Subarani vd., 2013) şeklinde verilebilir. XRD sonuçları, çilek saplarından elde edilen adsorban malzemenin belirli kristalin bölgeler içerdiğini göstermektedir. Bu yapısal özellik, adsorbanın mekanik olarak kararlı bir yapıya sahip olmasına katkı sağlamaktadır (Saygılı, H., 2016).

## 5.2. Adsorpsiyon Deneyleri

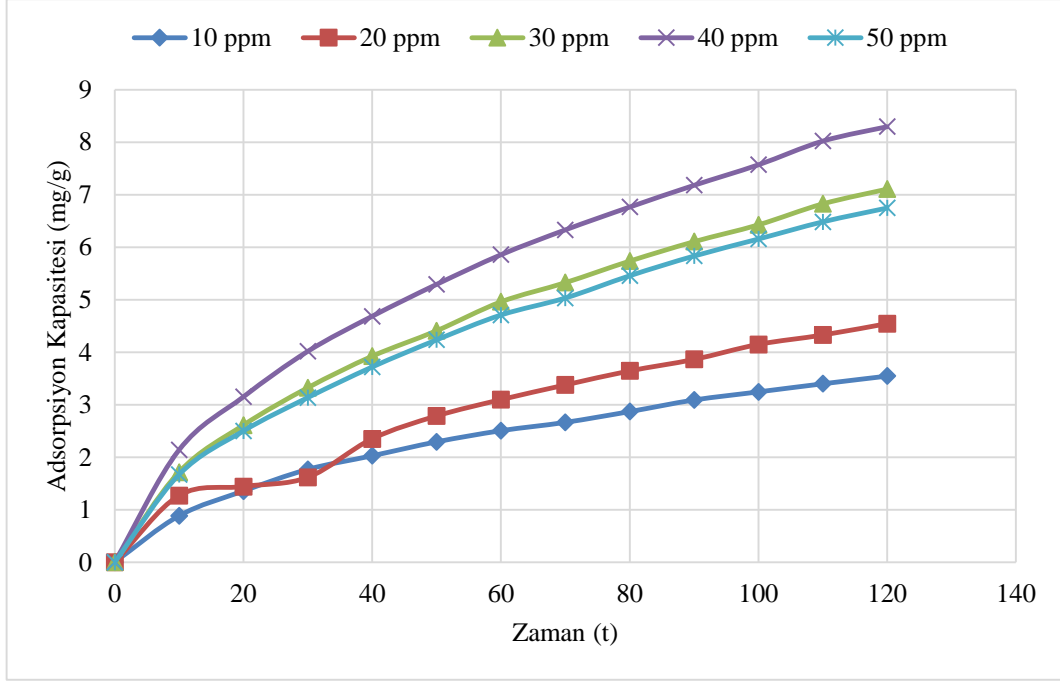
Metil Oranj boyar maddesinin sulu çözeltilerde değişen konsantrasyonlarına bağlı olarak adsorpsiyonunun durumu araştırılmıştır. Farklı başlangıç konsantrasyonlarında zamana bağlı adsorpsiyon yüzdesi Şekil 5.5'te görülmektedir.



Şekil 5.5. Adsorpsiyon Yüzdesinin Başlangıç Konsantrasyonuna Bağlı Değişimi

Şekil 5.5' te görüldüğü gibi, başlangıç Metil Oranj konsantrasyonu 10 ppm'den 50 ppm'e artarken adsorpsiyonun yüzdesinin azaldığı görülmektedir. Buna göre; adsorpsiyon yüzdesinin en yüksek 10 ppm için ve en düşük 50 ppm için elde edildiği belirlenmiştir. Bu durum, düşük başlangıç konsantrasyonlarında çözelti içerisindeki adsorbat molekül sayısının adsorban yüzeyindeki aktif bölgelere kıyasla daha az olması ve aktif bölgelerin büyük kısmının erişilebilir durumda bulunması ile açıklanabilir (Yagub vd., 2014). Yüksek konsantrasyonlarda ise aktif bölgelerin doygunluğa yaklaşması, giderim yüzdesinin azalmasına neden olmaktadır (Huang vd.,2017).

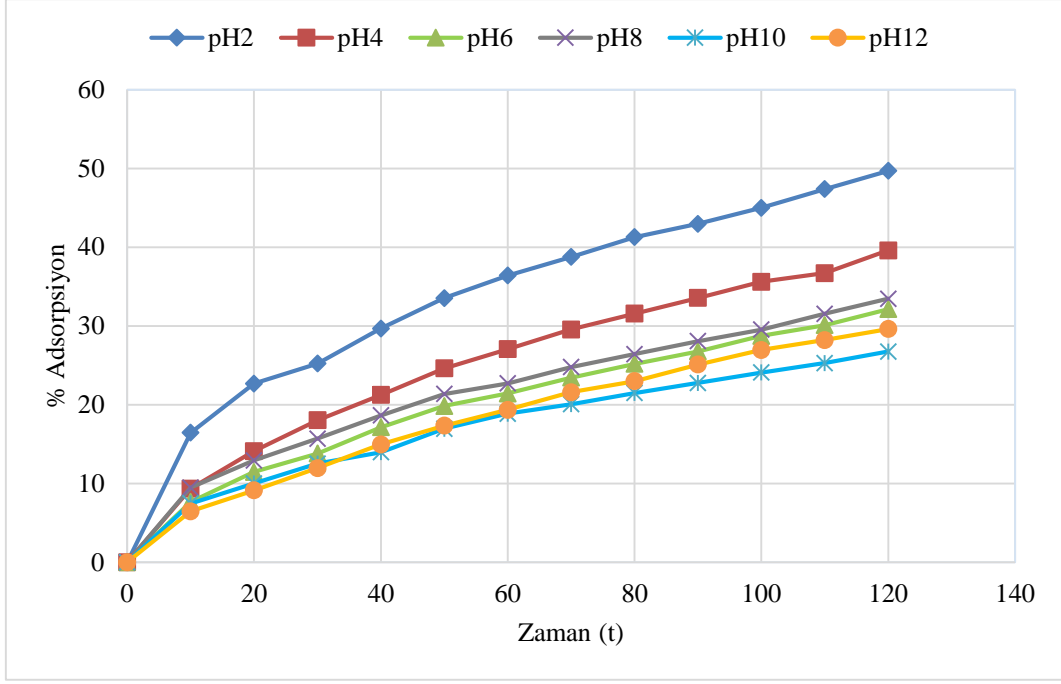
Değişen başlangıç konsantrasyonunun adsorbanın adsorpsiyon kapasitesine etkisi Şekil 5.6'da yer almaktadır.



Şekil 5.6. Adsorpsiyon Kapasitesinin Başlangıç Konsantrasyonuna Bağlı Değişimi

Şekil 5.6.'da verilen adsorpsiyon kapasitesi grafiği incelendiğinde, 10 ppm için en düşük adsorpsiyon kapasitesi elde edildiği görülmektedir. Artan konsantrasyon ile kapasite değerleri de artarken 50 ppm için bir düşüş gözlenmiştir. Konsantrasyonun artması, birim kütle adsorban başına daha fazla boya molekülünün tutulmasına olanak sağlamakta ve bu durum adsorpsiyon kapasitesini artırmaktadır (Crini, 2006). Ancak daha yüksek konsantrasyonlarda, adsorban yüzeyindeki aktif bölgelerin doygunluğa ulaşması sonucu kapasitede azalma meydana gelmiştir (Foo ve Hameed,2010). En yüksek adsorplama kapasitesi 40 ppm başlangıç konsantrasyonu için elde edilmiştir. Değişen başlangıç konsantrasyonun adsorpsiyon kapasitesi için gösterdiği sonuçlar temel alınarak, 40 ppm başlangıç konsantrasyonu etkin adsorplama performansı göz önünde bulundurulmuş ve optimum başlangıç konsantrasyonu olarak seçilmiştir.

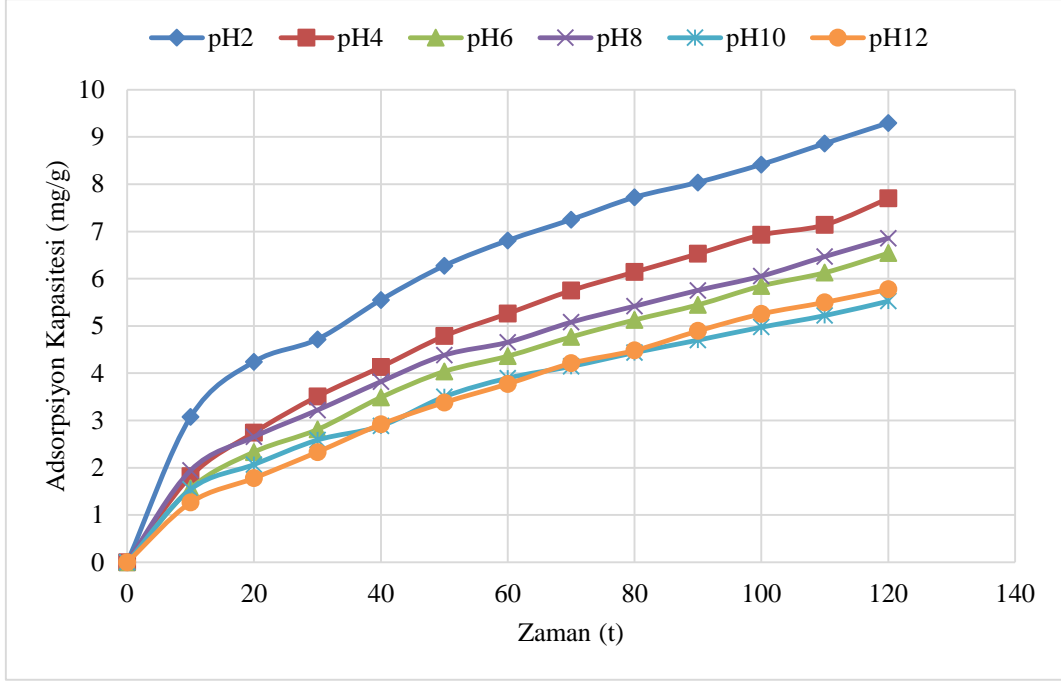
pH'nın adsorpsiyon prosesi üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla, farklı pH değerlerinde deneyler yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen adsorpsiyon yüzdesi değerleri Şekil 5.7.'de yer almaktadır.



Şekil 5.7. Adsorpsiyon Yüzdesinin pH'a Bağlı Değişimi

Şekil 5.7 incelendiğinde, Metil Oranj içeren sulu çözeltinin pH değeri 2 iken en yüksek adsorpsiyon yüzdesinin elde edildiği, pH değerinin 2'den 12'ye artmasıyla adsorpsiyon yüzdesinin azaldığı ve pH 12'de en düşük değeri aldığı görülmektedir. Metil Oranj anyonik karakterli bir azo boya olup sülfonat ( $-SO_3^-$ ) grupları içermektedir. Asidik ortamda adsorban yüzeyindeki fonksiyonel gruplar protonlanarak yüzey pozitif yük kazanmakta ve anyonik boya molekülleri ile elektrostatik çekim kuvvetleri oluşmaktadır. Bu nedenle düşük pH değerlerinde adsorpsiyon artmaktadır (Alyasi vd.,2023; Yagub vd., 2014). Bu nedenle pH 2'de en yüksek adsorpsiyon yüzdesi elde edilmiştir. pH arttıkça ortamda  $OH^-$  iyonlarının artması, adsorban yüzeyindeki protonlanmanın azalmasına ve yüzey yükünün negatife dönmesine neden olmakta, böylece elektrostatik itme kuvvetleri artarak adsorpsiyon verimi düşmektedir (Muinde vd.,2017).

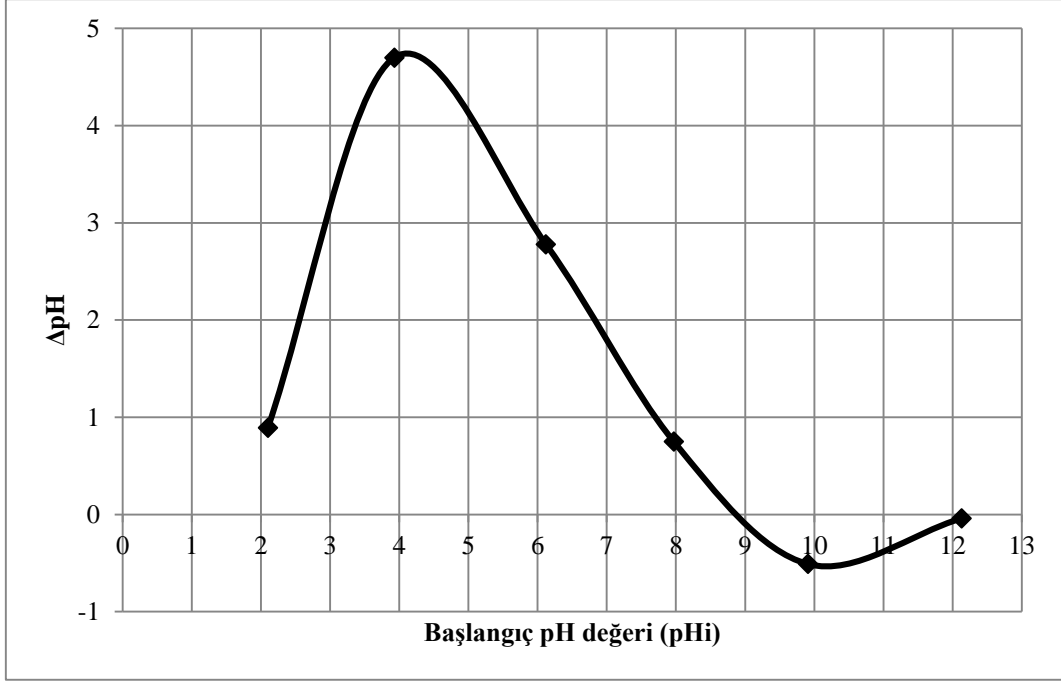
Şekil 5.8, sulu çözeltinin pH değişiminin adsorpsiyon kapasitesine etkisini göstermektedir.



Şekil 5.8. Adsorpsiyon Kapasitesinin pH'a Bağlı Değişimi

Şekil 5.8, Şekil 5.7'de yer alan adsorpsiyon yüzdesi grafiğine benzer eğilim göstermiş ve artan pH değerleri ile adsorpsiyon kapasitesinin düştüğünü ortaya koymuştur. Buna göre; adsorpsiyon kapasitesi en yüksek pH 2 için, en düşük pH 12 için elde edilmiştir. pH etkisi çalışmalarında artan pH değerlerinin adsorpsiyon yüzdesi ve kapasite değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Metil Oranj adsorpsiyonu için pH 2'nin en yüksek değerleri sağladığını ortaya koymaktadır.

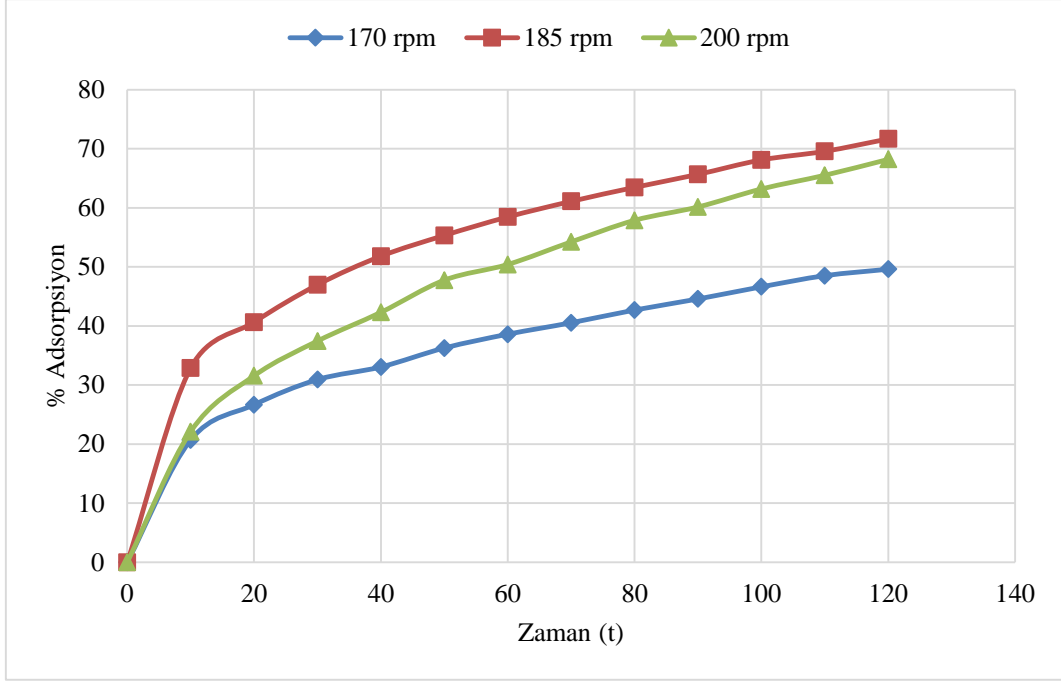
Adsorpsiyon mekanizmalarının aydınlatılmasında temel bir parametre olan  $pH_{pzc}$ , adsorban yüzeyindeki net yük yoğunluğunun sıfır olduğu pH değerini ifade eder (Kosmulski, 2023).  $pH_{pzc}$  değerinin bilinmesi, yüzeydeki fonksiyonel grupların iyonlaşma eğilimleri hakkında öngörü sağlayarak adsorpsiyon sürecini yönlendirir; nitekim çözelti pH'ı  $pH_{pzc}$  değerinin üzerine çıktığında yüzey deprotonize olarak negatif yüklenmekte ve katyonik türlerin tutunmasını kolaylaştırmaktadır. Aksine,  $pH_{pzc}$ 'den düşük pH değerlerinde yüzeyin protonlanarak pozitif yük kazanması, anyonik bileşenlerin adsorpsiyonu için uygun bir ortam hazırlamaktadır (Fiol ve Villaescusa, 2009; Kosmulski, 2023). Adsorban için elde edilen  $pH_{pzc}$  grafiği Şekil 5.9.'de sunulmuştur.



**Şekil 5.9.** Sıfır Yük Noktası ( $pH_{pzc}$ )

Şekil 5.9.'da verilen grafik ile adsorbanın  $pH_{pzc}$ 'ı 8,8 olduğu bulunmuştur. Adsorpsiyon kapasitesi, adsorban yüzeyinin iyonlaşma derecesi ve çözeltideki iyonların elektrostatik etkileşimlerinden doğrudan etkilenmektedir (Talebian ve Sagir,2024).  $pH < pH_{pzc}$  koşullarında adsorban yüzeyi protonlanarak pozitif yük kazanır ve anyonik Metil Oranj boyar maddesinin adsorpsiyonunu destekler (Azam vd.,2013).

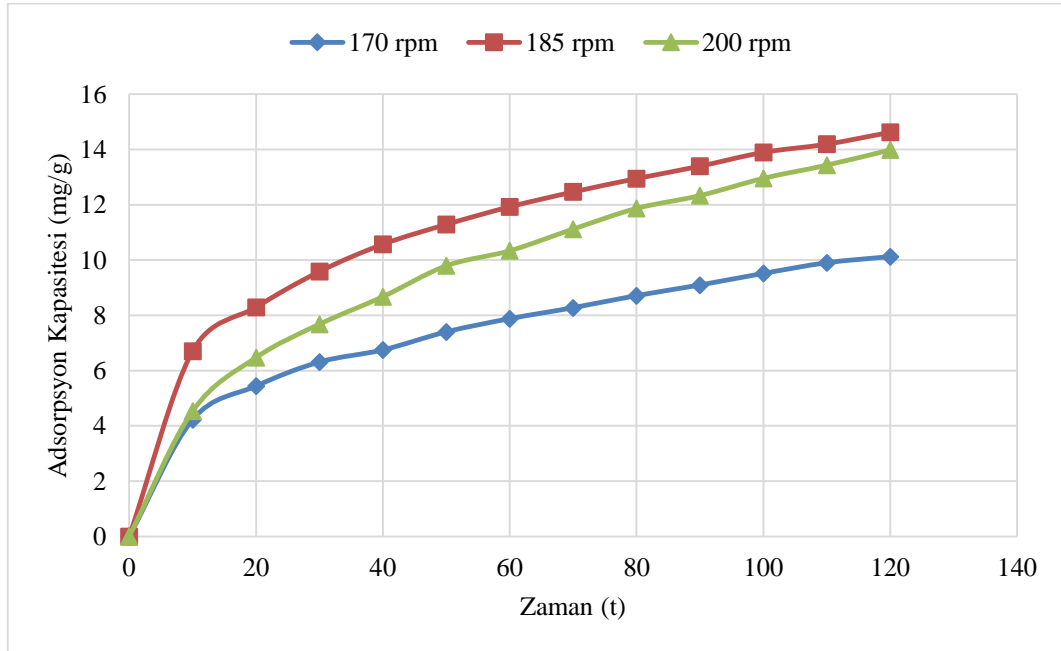
Kullanılan su banyosunun çalkalanma hızının adsorpsiyon üzerindeki etkisini belirlemek için deneyler gerçekleştirilmiştir. Farklı çalkalama hızlarında elde edilen adsorpsiyon yüzdeleri Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10. Adsorpsiyon Yüzdesinin Çalkalama Hızına Bağlı Değişimi

Şekil 5.10’da, en düşük adsorpsiyon yüzdesi 170 rpm çalkalama hızı için belirlenmiştir. Çalkalama hızının 185 rpm’e çıkarılmasıyla adsorpsiyonun belirgin derecede arttığı görülmektedir. Çalkalama hızının daha da artırılarak 200 rpm’e yükseltilmesi durumunda ise adsorpsiyon yüzdesi azalma göstermiştir.

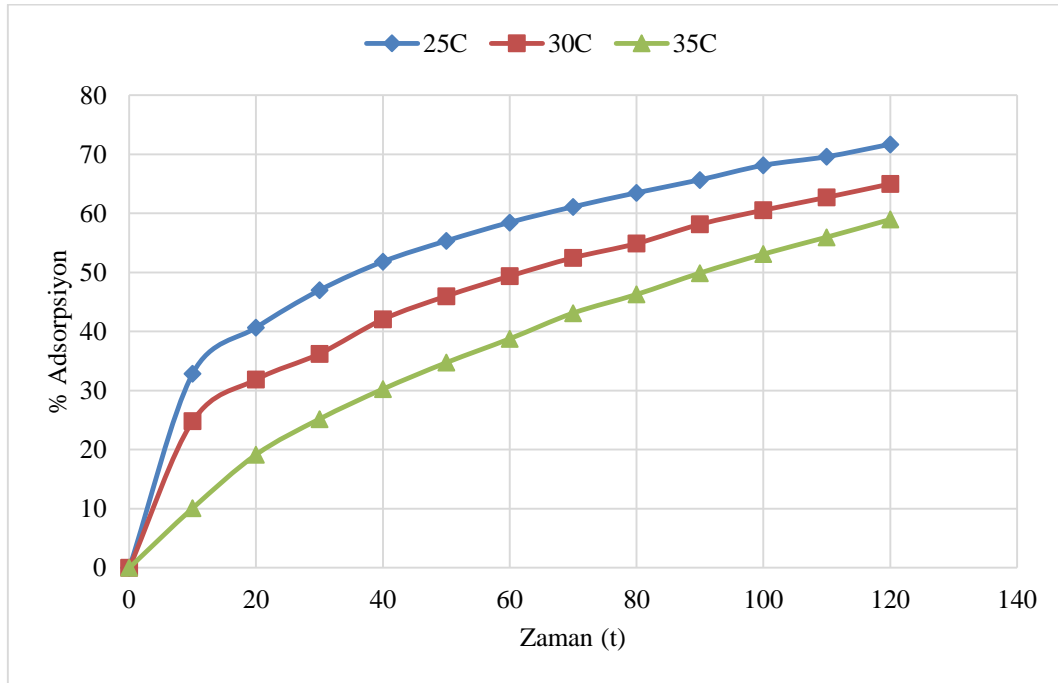
Şekil 5.11 çalkalama hızının adsorpsiyon kapasite değerlerine etkisini sunmaktadır.



Şekil 5.11. Adsorpsiyon Kapasitesinin Çalkalama Hızına Bağlı Değişimi

Şekil 5.11, çalkalama hızının adsorpsiyon yüzdesi üzerindeki etkilerine ait sonuçlara benzer şekilde, kapasite değerleri için de 185 rpm de en yüksek ve 170 rpm’de en düşük değerlerin elde edildiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, 170 rpm’in çalkalama hızının adsorban ile adsorbat arasındaki kütle transferi ve temas için yetersiz kaldığı söylenebilir (Alyasi vd.,2023). Buna karşılık 200 rpm’de oluşan yüksek türbülansın, adsorban ve adsorbat moleküllerinin kinetik enerjisini artırarak zayıf bağlarla tutunan türlerin yüzeyden uzaklaşmasına neden olduğu ve bu nedenle adsorpsiyon etkileşimlerini olumsuz etkilediği yapılan literatür çalışmalarıyla desteklenmiştir (Ahsan vd,2011).

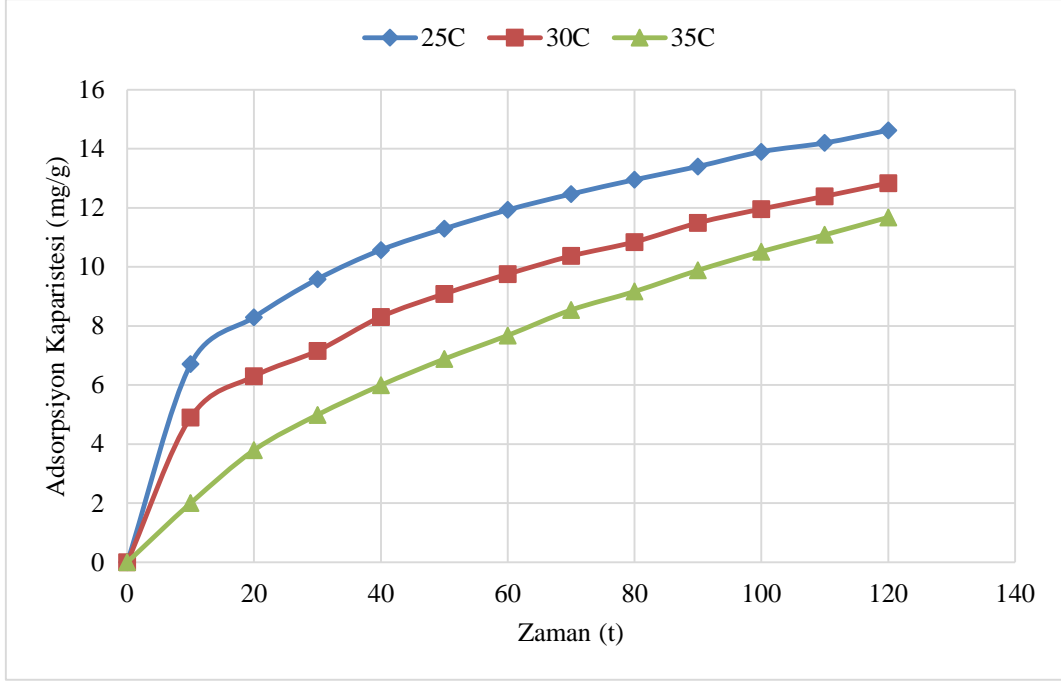
Sıcaklığın Metil Oranj adsorpsiyon prosesine etkisi zamanla takip edilmiş ve farklı sıcaklıklarda elde edilen adsorpsiyon yüzdesindeki değişim Şekil 5.12’de sunulmuştur.



Şekil 5.12. Adsorpsiyon Yüzdesinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Şekil 5.12’de sıcaklık arttıkça adsorpsiyon yüzdesi değerlerinde bir azalma olduğu görülmektedir. Buna göre, 25 °C’de en yüksek adsorpsiyon ve 35 °C’de en düşük adsorpsiyon gerçekleşmiştir.

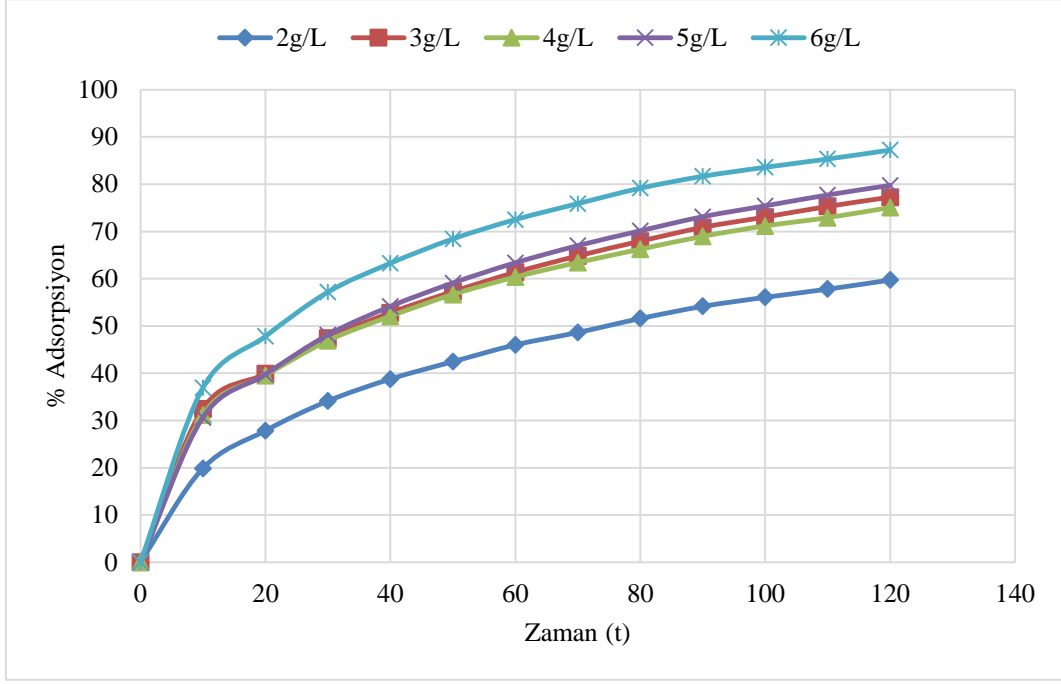
Sıcaklığın adsorpsiyon kapasitesine etkisini belirlemek için Şekil 5.13 kullanılmıştır.



Şekil 5.13. Adsorpsiyon Kapasitesinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Şekil 5.13’de verildiği gibi, artan sıcaklıkla, adsorpsiyon yüzdesine benzer şekilde, adsorpsiyon kapasitesi değerlerinde bir azalma gözlenmiştir. Sıcaklığın adsorpsiyon yüzdesi ve adsorpsiyon kapasitesine etkisi çalışmaları sonucunda, adsorpsiyon sürecinin ekzotermik karakterde olduğu ve düşük sıcaklıklarda daha verimli gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu nedenle, 25 °C en etkin sıcaklık değeri olarak tespit edilmiştir.

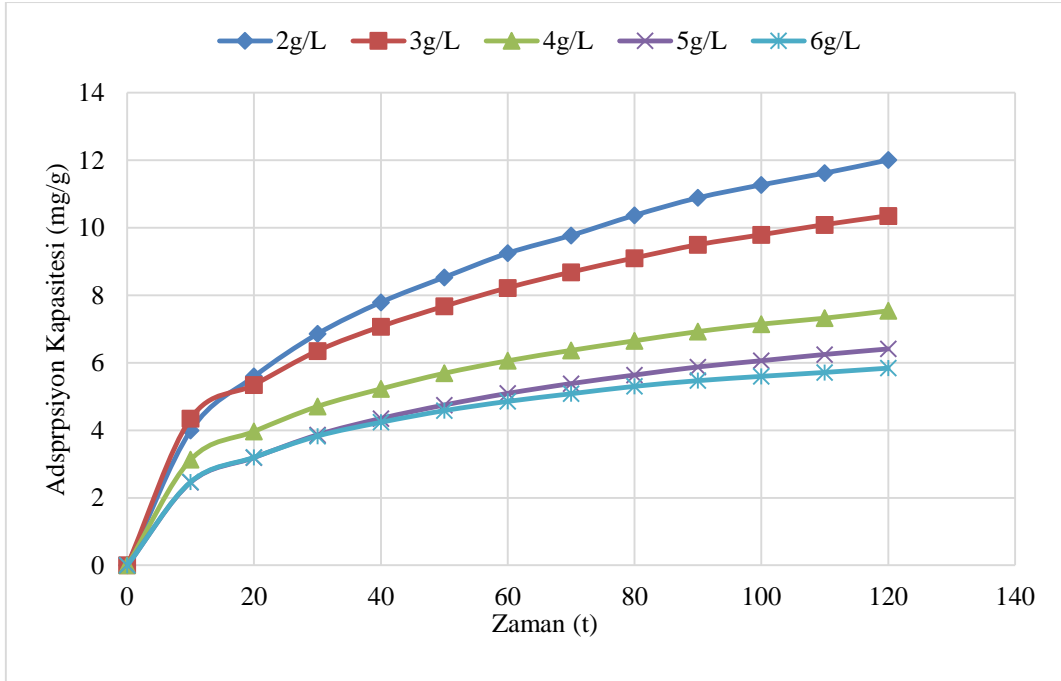
Adsorban miktarının adsorpsiyon prosesine etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen deneyler sonucunda, Şekil 5.14’te yer alan adsorpsiyon yüzdesi eğrisi elde edilmiştir.



Şekil 5.14. Adsorpsiyon Yüzdesinin Adsorban Miktarına Bağlı Değişimi

Şekil 5.14.'e göre, adsorban dozağı adsorpsiyon yüzdesine olumlu katkıda bulunmuştur. Diğer bir deyişle, fazla adsorban kullanıldığında çözülden daha fazla adsorbat adsorplanmıştır.

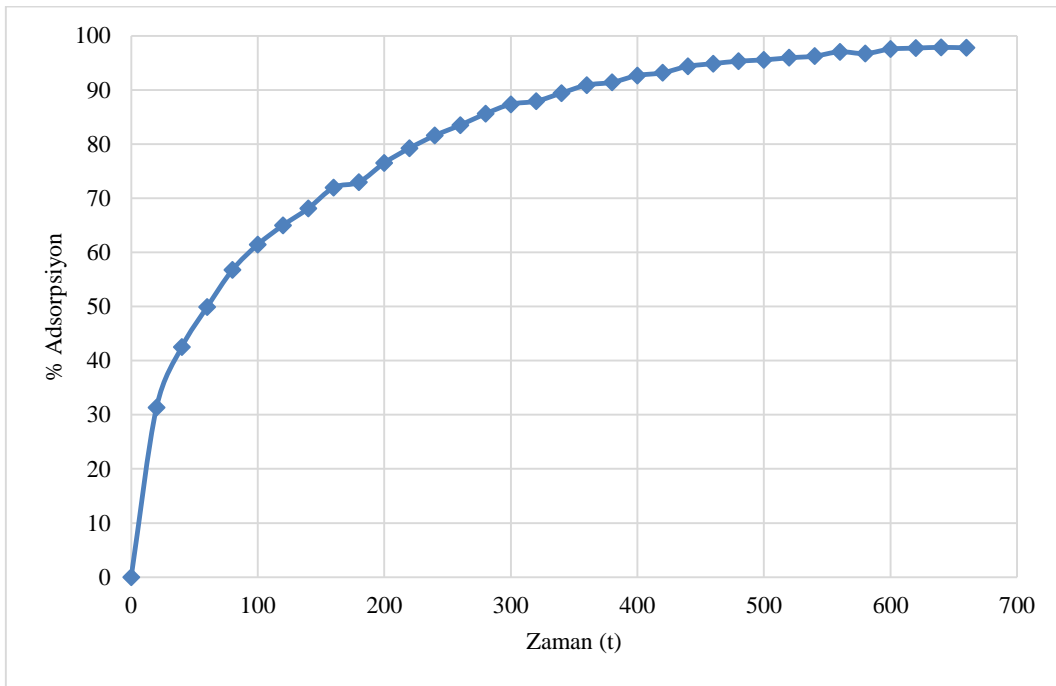
Şekil 5.15 adsorban miktarındaki değişimin adsorpsiyon kapasitesine etkisine aittir.



Şekil 5.15. Adsorpsiyon Kapasitesinin Adsorban Miktarına Bağlı Değişimi

Şekil 5.15 incelendiğinde, en yüksek adsorpsiyon kapasitesinin 2 g/L için elde edildiği ve adsorban miktarının artmasıyla kapasite değerinin oldukça düştüğü belirlenmiştir. Buna göre, artan adsorban miktarının adsorpsiyon kapasitesini düşürdüğü görülmüştür. Bu durum, çözeltideki iyon başına düşen adsorban yüzey alanının azalmasından kaynaklanmaktadır (Sipahi, 2019). Proses için en uygun adsorban miktarı için 2 g/L belirlenmiştir.

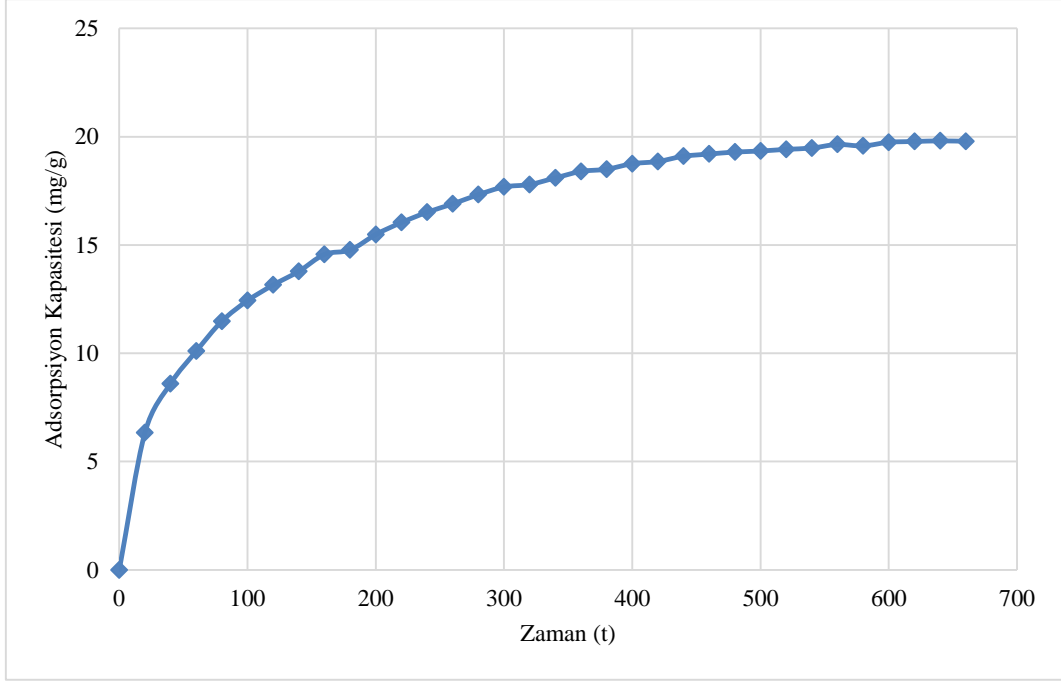
Adsorpsiyonun dengeye ulaşma süresinin belirlenmesi için deneyler yapılmıştır. Zaman çalışmaları yukarıda incelenen parametre çalışmalarında en uygun olarak belirlenen değerler için gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen adsorpsiyon yüzdesi değişimine ait veriler Şekil 15.16'da görülmektedir.



Şekil 5.16. Adsorpsiyon Yüzdesinin Zamana Bağlı Değişimi

Şekil 5.16'da zamanla prosesin adsorpsiyon yüzdesinin azaldığı görülmektedir. Zamanla adsorpsiyonda azalma eğilimi artsa da yüksek adsorpsiyon yüzdesi değerlerine ulaşıldığı da belirlenmiştir. Adsorpsiyon yüzdesinin değişmediği son değerler adsorpsiyonun dengeye ulaştığını göstermiştir. Bu değer Metil Oranj adsorpsiyon prosesi için 660 dakika sonunda elde edilmiştir. Çilek sapsarı ile hazırlanan adsorbanın, denge anında %97,82 Metil Oranj adsorpsiyonu sağladığı görülmüştür.

Şekil 5.17 ise; dengeye ulaşma süresince adsorpsiyon kapasite değerlerinin değişimini göstermektedir.



**Şekil 5.17.** Adsorpsiyon Kapasitesinin Zamana Bağlı Değişimi

Şekil 5.17, proses için adsorpsiyon kapasitesinin adsorpsiyon yüzdesine benzer davranışını ortaya koymaktadır. Buna göre; 660 dakika sonunda adsorpsiyon kapasitesi de sabit değerlere ulaşmıştır. Burada, hazırlanan adsorban ile ulaşılan en yüksek adsorpsiyon kapasitesi 19.80 mg/g olarak belirlenmiştir.

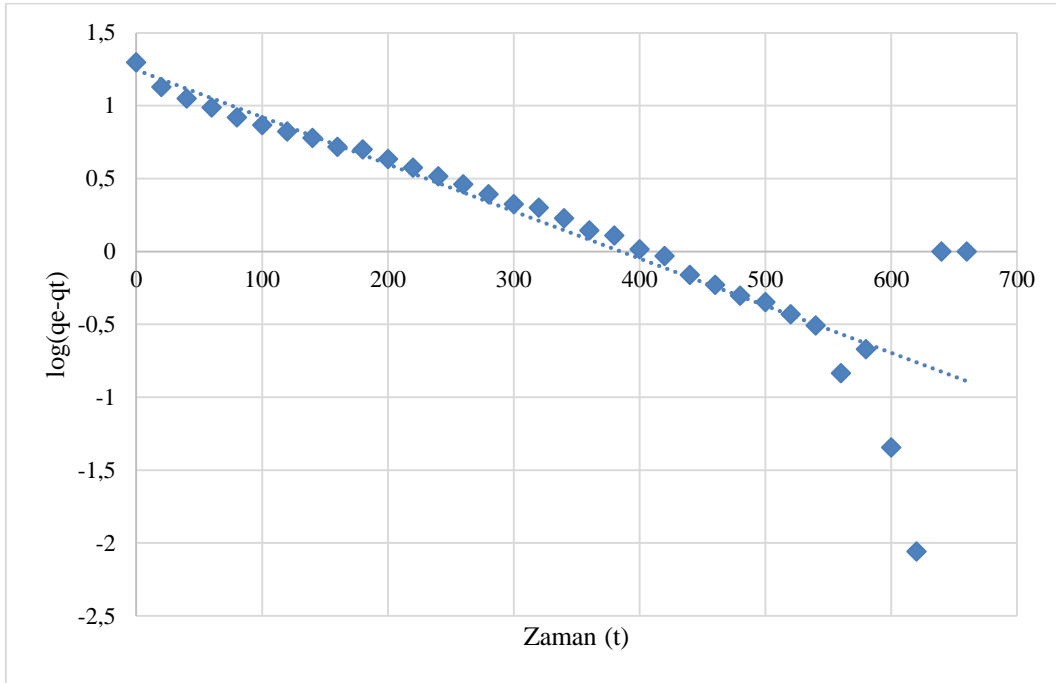
### 5.3. Metil Oranj ile İlgili Literatürde Yer Alan Çalışmalar

Çilek sapsarı ile hazırlanan adsorbanın Metil Oranjın adsorpsiyonunda gösterdiği etkinliğin diğer çalışmalara kıyaslanabilmesi amacıyla, literatürde yer alan ve Metil Oranj adsorpsiyonu yapılan bazı çalışmalar incelenmiştir. Serban ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, ticari bir aktif karbon ile %97,8 Metil Oranj giderim etkinliği elde edilmiştir (Serban vd., 2023). Wang ve arkadaşları hazırladıkları kuaternize manyetik kitosan ile %99,38 Metil Oranj giderimi elde ettiklerini belirtmişlerdir (Wang vd., 2025a). Zhu ve arkadaşları MnO<sub>2</sub>/organik asit sistemi ile Metil Oranj için % 90,6 giderim etkinliğine ulaşmışlardır (Zhu vd., 2020). Nazri ve Sapawe, Metil Oranj adsorpsiyonu için bambu yaprağı külünden elde ettikleri silika nanopartikülleri ve hazırladıkları mezogözenekli silika nanopartikülleri ile sırasıyla %83,88 ve %92,48 giderim oranları bildirmişlerdir (Nazri ve Sapawe, 2020). Ramutshatsha-Makhwedzha ve arkadaşları portakal ve limon kabuklarından elde edilen aktif karbon ile gerçekleştirdikleri Metil Oranj adsorpsiyonunda %96 giderim sağlamışlardır (Ramutshatsha-Makhwedzha vd., 2022). Dutta ve arkadaşları jak meyvesi yaprağı tozu ile %78.10 oranında Metil Oranj giderim

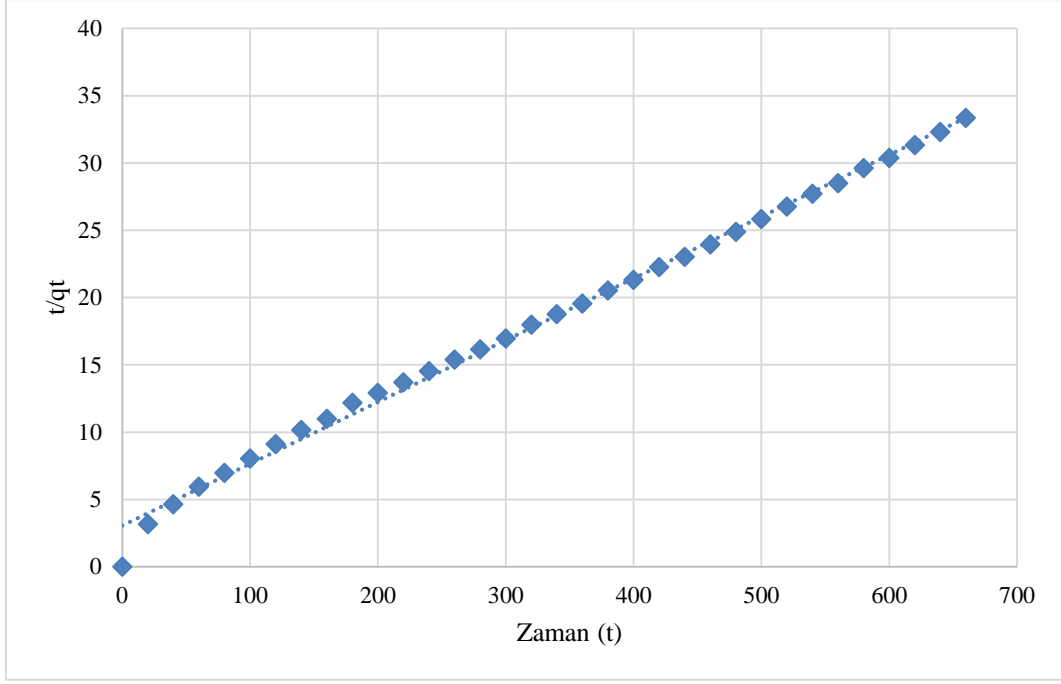
etkinliği sağladıklarını belirtmişlerdir (Dutta vd., 2022). Bu çalışmada elde edilen Metil Oranj adsorpsiyon yüzdesi (%97,82), literatürde yer alan diğer Metil Oranj adsorpsiyonu çalışmaları ile belirlenen giderim değerleri ile kıyaslandığında, yüksek bir adsorpsiyon performansının sağlandığı görülmüştür.

#### 5.4. Adsorpsiyon Kinetik Çalışmaları

Adsorpsiyon kinetik çalışmaları kapsamında adsorpsiyonun, YBD ve YİD kinetik modelleri ile uyumu incelenmiştir. Adsorpsiyon prosesine ait YBD ve YİD kinetik denklemlere ait grafikler sırasıyla Şekil 5.18. ve 5.19’da sunulmuştur. Tablo 5.1’ de ise; her iki kinetik modele ait parametre hesaplamaları yer almaktadır.



Şekil 5.18. YBD Denklem Eğrisi



Şekil 5.19. YİD Denklem Eğrisi

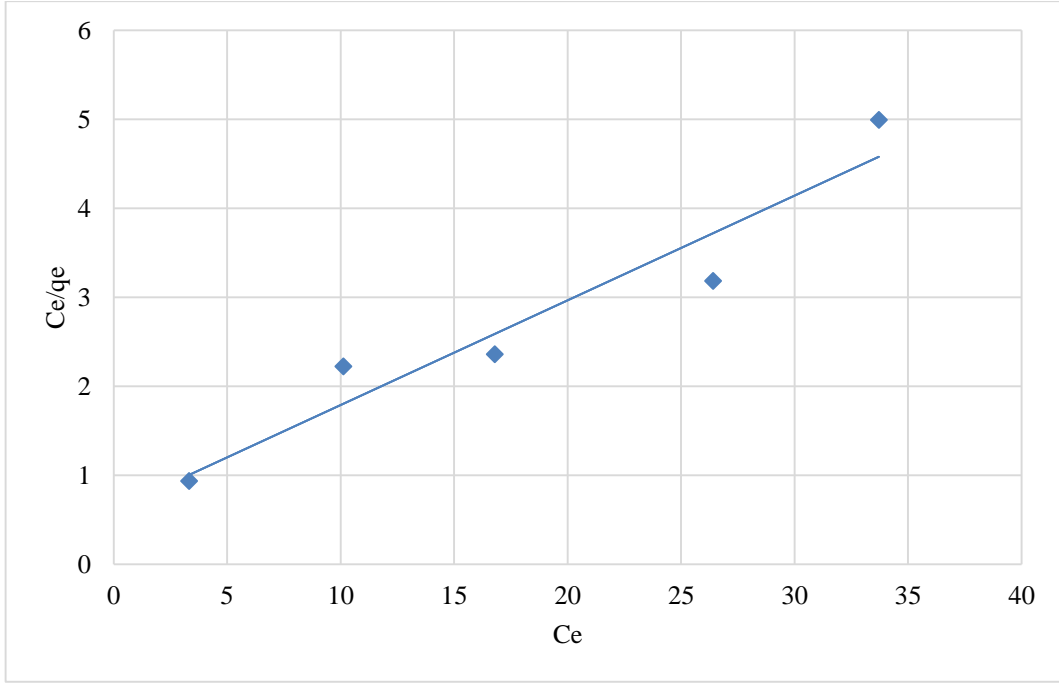
Tablo 5.1. YBD ve YİD Model Parametreleri

YBD Kinetik Model			YİD Kinetik Model		
$k_1$ ( $\times 10^3$ ) ( $dk^{-1}$ )	$q_{e, \text{hes}}$ ( $mg\ g^{-1}$ )	$R^2$	$k_2$ ( $\times 10^3$ ) ( $g\ mg^{-1}\ dk^{-1}$ )	$q_{e, \text{hes}}$ ( $mg\ g^{-1}$ )	$R^2$
7.37	17.567	0.7858	0.691	21.786	0.9950

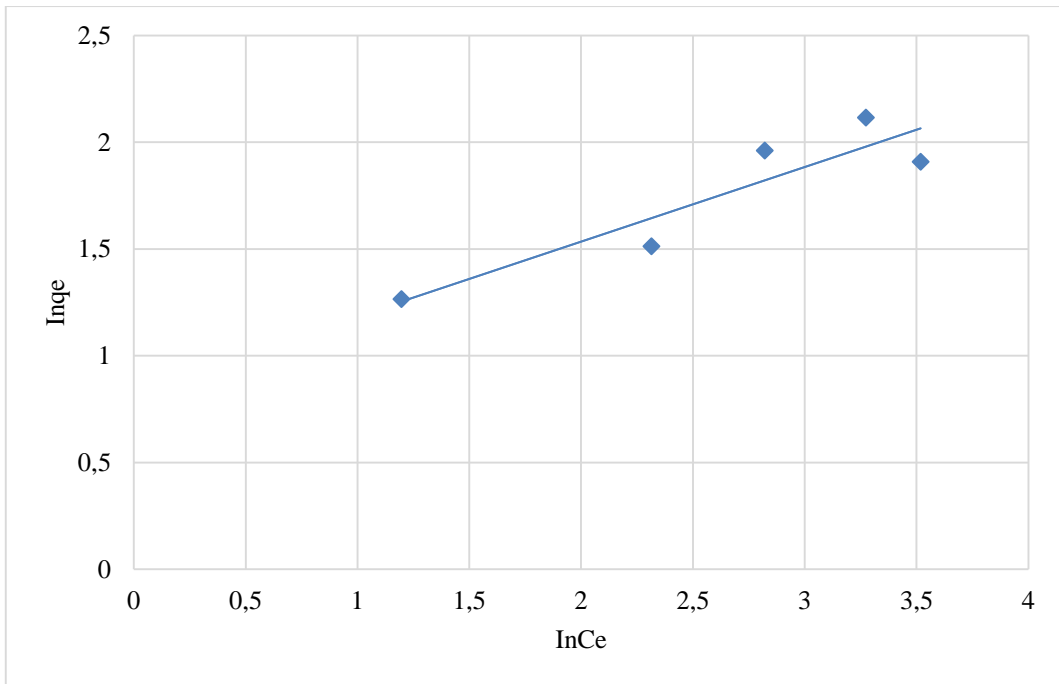
Tablo 5.1’ de yer alan  $R^2$ ’ler kıyaslandığında, YİD model için YBD modelden daha büyük olarak bulunan ve 1’e daha yakın olan  $R^2$ ’nin (0.9950) yardımıyla YİD modelin prosesi en iyi açıkladığı belirlenmiştir. YİD model prosesin adsorpsiyon hızının kimyasal etkileşimler ile kontrol edildiğini ifade eder (Ho ve McKay, 1999). Dolayısıyla, Metil Oranj adsorpsiyonu prosesinin büyük ölçüde kimyasal etkileşimler ile gerçekleştiği ve prosesin kimyasal adsorpsiyon mekanizmasını izlediği sonucuna varılmıştır (Haryanto vd., 2023).

### 5.5. Adsorpsiyon İzoterm Çalışmaları

Metil Oranj adsorpsiyonu prosesi için, Langmuir ve Freundlich izoterm modelleri incelenerek, hazırlanan Langmuir ve Freundlich model grafikleri sırasıyla Şekil 5.20 ve Şekil 5.21.’de verilmiştir. Tablo 5.2’de her iki izoterm model için hesaplanan parametre değerlerine yer verilmiştir.



Şekil 5.20.Langmuir Model Eğrisi



Şekil 5.21. Freundlich Model Eğrisi

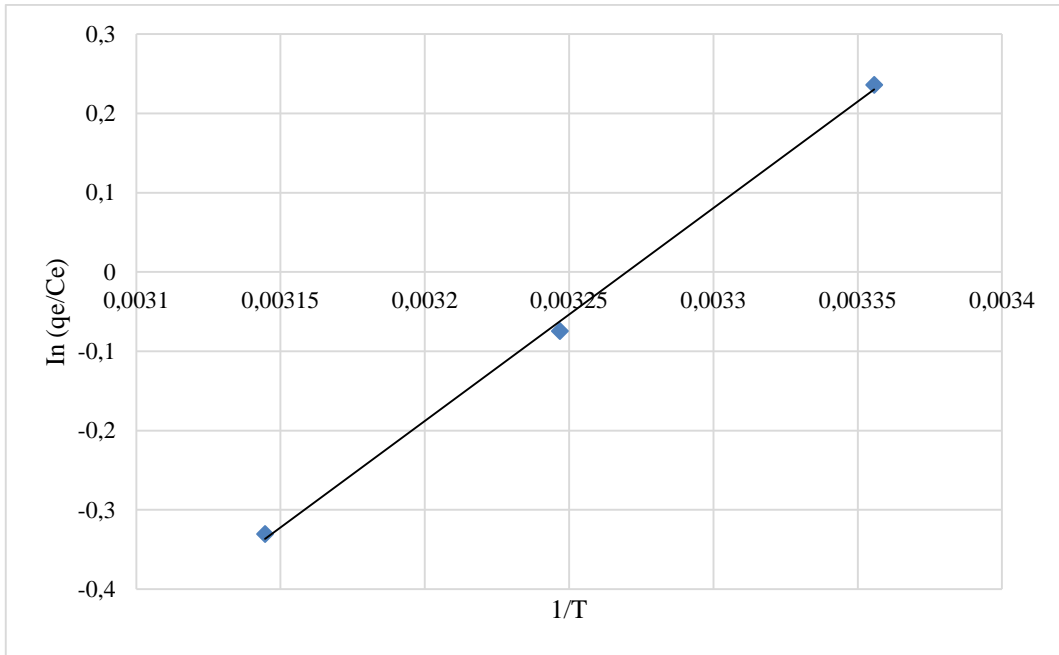
**Tablo 5.2.** Langmuir ve Freundlich Model Parametreleri

Langmuir İzoterm Model			Freundlich İzoterm Model		
$K_L$ (L mg <sup>-1</sup> )	$q_m$ (mg g <sup>-1</sup> )	$R^2$	$K_F$ (mg g <sup>-1</sup> (L/g) <sup>1/n</sup> )	n	$R^2$
0.1913	8.503	0.9222	2.3059	2.86	0.8390

Tablo 5.2'deki izoterm modeller için elde edilen  $R^2$ 'ler için, Langmuir modele ait  $R^2$  (0.9222) değerinin Freundlich izoterm modeline ait  $R^2$  (0.8390) değerinden daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, prosesin Langmuir model ile yüksek derecede uyumlu olduğunu göstermektedir. Langmuir modelin uygunluk göstermesi, adsorban yüzeyindeki aktif alanların homojen bir şekilde yer aldığını ve adsorpsiyonun tek tabakalı (monolayer) olarak gerçekleştiğini açıklamaktadır (Özbaş vd., 2019). Dolayısıyla, elde edilen veriler, çilek sapları üzerinde Metil Oranjın düzenli ve tek tabakalı bir şekilde adsorbe olduğunu ortaya koymaktadır (Ustama, Y., 2023).

### 5.6. Adsorpsiyon Termodinamik Çalışmaları

Adsorpsiyon prosesinin termodinamik açıdan incelemesi amacıyla Şekil 5.22 oluşturulmuştur. Tablo 5.3 ise; adsorpsiyonun termodinamik parametrelerine ilişkin hesaplamalar ve sonuçlara aittir.  $\Delta G^0$ ,  $\Delta H^0$  ve  $\Delta S^0$  gibi adsorpsiyonun termodinamik parametreleri termodinamik denklemlerden hesaplanmıştır.



**Şekil 5.22.** ln (qe/Ce)'ye karşı 1/T grafiği

**Tablo 5.3.** Termodinamik İle İlişkili Parametreler

Sıcaklık, K	$\Delta G^0$ , kJ mol <sup>-1</sup>	$\Delta H^0$ , kJ mol <sup>-1</sup>	$\Delta S^0$ , J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
298	-0.565	-43.246	-143.225
308	0.151		
318	0.867		

Tablo 5.3'te sunulan termodinamik veriler incelendiğinde,  $\Delta H^0$  değerinin negatif olması adsorpsiyon sürecinin ekzotermik bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir (Mustapha vd.,2019). Bunun anlamı, adsorpsiyon sırasında sistemin çevreye ısı verdiğidir. Ek olarak,  $\Delta H^0$ 'ın sahip olduğu değer kimyasal adsorpsiyonu desteklemektedir (Sumardiono vd.,2025).  $\Delta S^0$  değerinin negatif olması, adsorpsiyon sırasında ara yüzeydeki düzensizliğin azaldığını ve adsorban ile adsorbat arasındaki etkileşimlerin düzenli bir yapıya yol açtığını ifade etmektedir. Ayrıca,  $\Delta G^0$  değerinin negatif çıkması adsorpsiyon prosesinin kendiliğinden yürüdüğünü ortaya koymaktadır (Çiçekçi vd.,2020).

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, aktif karbon çilek saplarının Metil Oranj boyar maddesinin adsorpsiyonunu araştırmıştır.

Öncelikle aktif karbon sentezi gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla ön ısıtma işlemi,  $K_2CO_3$  aktivasyonu ve ısıtma aktivasyonu içeren üç aşamalı bir yöntem çilek saplarının üretimi için kullanılmıştır.

Hazırlanan adsorban adsorplayıcı gruplar, elementel içerik, yüzey özellikleri, yapı ve sıcaklık davranışı bakımından karakterize edilmiştir. Adsorbanın çoğunlukla C-H ve C-O grupları taşıdığı FTIR analizi ile belirlenmiştir. Adsorbana ait yüzey incelemeleri geniş BET yüzey alanını ve mezogözenekli yapıyı ortaya koyarken, düzensiz morfolojideki yüzeyde yer alan gözenek dağılımının ve boşlukların adsorpsiyonu desteklediği yorumlanmıştır. Çalışılan sıcaklık değerleri için adsorbanın kararlı olduğu belirlenmiştir. Malzemenin yüksek karbon içeriğinin yanı sıra kristalin yapısı da aydınlatılmıştır.

Adsorbanın Metil Oranj boyar maddesini adsorpsiyonuna ait proses, etkili parametrelerin araştırıldığı deneyler ile açıklanmıştır. Konsantrasyon (10-50 ppm), pH (2-12), çalkalama hızı (170-200 rpm), sıcaklık (25-35°C), miktar (2-6 g/L) ve temas süresi parametreleri için deneyler gerçekleştirilmiş ve adsorpsiyon yüzdesi ve adsorpsiyon kapasitesi değerlendirmelerine bağlı olarak en uygun parametre değerleri belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneylere bağlı olarak, adsorbanın Metil Oranj boyar maddesinin adsorpsiyonunu 660 dakikada tamamladığı belirlenmiştir. 660 dakika sonunda en yüksek adsorpsiyon yüzdesi ve kapasitesine ulaşarak %97,82 adsorpsiyon yüzdesi ve 19,8 mg/g adsorpsiyon kapasitesi sergilediği ortaya konmuştur.

Adsorpsiyon prosesinin açıklanması farklı modellerle ve hesaplamalarla gerçekleştirilmiştir. YİD kinetik modele göre; adsorpsiyon prosesi kimyasal adsorpsiyondur; kimyasal etkileşimler ile adsorpsiyon gerçekleşmektedir. Langmuir izoterm model ise; adsorpsiyon sırasında Metil Oranj moleküllerinin tek tabakalı halde düzenli dizilimini belirtmektedir. Adsorpsiyon sırasında sistemden çevreye ısı yayılımı ve adsorpsiyon ile ara yüzeyde artan düzen ise termodinamik hesaplamalar sonucunda belirlenmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma çilek saplarının Metil Oranj adsorpsiyonu için etkin bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

## KAYNAKÇA

- Abegunde, S. M., Idowu, K. S., Adejuwon, O. M., & Adeyemi-Adejolu, A. (2020). A review on the influence of chemical modification on the performance of adsorbents. *Resources, Environment and Sustainability*, 1, 100001.
- Acar, B. Ç. ve Acar, M. B. (2022). Kimyasal yöntemlerle atık sulardan ağır metal giderimi. *Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi*, 3(1), 1-13.
- Adar, E., Atay, İ., Gokboru Buncu, K., & Bilgili, M. S. (2020). Phenol removal from synthetic wastewater with powdered activated carbon: Isotherms, kinetics and thermodynamics. *Environmental Research & Technology*, 3(1), 8–14.
- Adelodun, A. A., Ngila, J. C., Kim, D.-G., & Jo, Y.-M. (2016). Isotherm, thermodynamic and kinetic studies of selective CO<sub>2</sub> adsorption on chemically modified carbon surfaces. *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 3312–3329.
- Adıyaman, B. (2023). Kaolin üzerine reactive black 5 adsorpsiyonunun araştırılması. Yüksek lisans tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu.
- Admawi, H. K. (2025). Adsorption of dye removal from aqueous solutions using natural bitter orange waste: An isotherm and kinetic processes study with efficiency evaluation under optimum conditions. *Progress in Engineering Science*, 2(4), 100156.
- Ahmed, A., Siyal, A. N., Bhatia, S., Memon, S. Q., & Mahar, A. (2020). Modified strawberry calyx as an efficient adsorbent for Ni(II) ions adsorption: A central composite design approach for multivariate sorption optimization. *Desalination and Water Treatment*, 191, 164–172.
- Ahsan, N., Shafique, U., Jamil, N., Munawar, M. A., & Anwar, J. (2011). Removal of toxic dichlorophenol from water by sorption with chemically activated carbon of almond shells—A green approach. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 33(6), 640.
- Akbari, A. J.(2019). Yer Fistiği Kabuğu/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Kompozit Materyali İle Sucul Ortamlardan Nikel Giderimi. (Yüksek Lisans Tezi). Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü,Konya.
- Alaqarbeh, M. (2021). Adsorption phenomena: definition, mechanisms, and adsorption types: short review. *Rhazes: Green and Applied Chemistry*, 13, 43-51.
- Albatrni, H., & Qiblawey, H. (2024). Evaluation of sodium thiosulfate activated carbon for high-performance mercury removal from aqueous solutions. *Environmental Technology & Innovation*, 34, 103621.
- Algarni, T. S., & Al-Mohaimed, A. M. (2022). Water purification by adsorption of pigments or pollutants via metal oxide. *Journal of King Saud University – Science*, 34, 102339.
- Al-Ghouti, M. A., & Da'ana, D. A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 393, 122383.
- Aljamali, N. M., Aldujaili, R. A. B., & Alfatlawi, I. O. (2021). Physical and chemical adsorption and its applications. *International Journal of Thermodynamics and Chemical Kinetics*, 7(2), 1–8.
- Altunkaynak, Y., Canpolat, M., & Yavuz, Ö. (2023). Sulu çözeltilerden Pb<sup>2+</sup> iyonlarının uzaklaştırılmasında atık portakal kabuklarının kullanılması: Kinetik ve termodinamik çalışmalar. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(2), 1105–1120.
- Alyasi, H., Mackey, H., & McKay, G. (2023). Adsorption of methyl orange from water using chitosan bead-like materials. *Molecules*, 28(18), 6561.
- Alyüz, B., & Veli, S. (2005). Low-cost adsorbents used in heavy metal contaminated wastewater treatment. *Journal of Engineering and Natural Sciences (Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi)*, Sigma, 2005(3).
- Amrutha, G., Jeppu, G., Girish, C. R., Prabhu, B., & Mayer, K. (2023). Multi-component adsorption isotherms: Review and modeling studies. *Environmental Processes*, 10, 38.

- Ashour, M., Alprol, A. E., Khedawy, M., Abualnaja, K. M., & Mansour, A. T. (2022). Equilibrium and kinetic modeling of crystal violet dye adsorption by a marine diatom, *Skeletonema costatum*. *Materials*, 15(18), 6375.
- Aslan, S. (2021). Çörek otu posasının aktif karbon üretiminde değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(1), 193–201.
- Azam, M. R., Tan, I. M., Ismail, L., Mushtaq, M., Nadeem, M., & Sagir, M. (2013). Static adsorption of anionic surfactant onto crushed Berea sandstone. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 3(3), 195-201.
- Bai, Y., Fan, P., Jing, Z., Gan, X., Hu, K., Zheng, H., & Shen, X. (2025). Adsorption of methyl orange using different viscosity chitosan/graphene oxide/gelatin hydrogel beads in wastewater. *International Journal of Biological Macromolecules*, 318, 145244.
- Bakhtaoui, Y., Ben Ali, M., Ouakki, M., El Khattabi, O., El Azzouzi, N., & Srhir, B. (2025). Efficient adsorption of methylene blue onto raw olive pomace from Moroccan industrial oil mills: Linear and nonlinear isotherm and kinetic modeling with error analysis. *Next Materials*, 9, 101072.
- Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). *Activated carbon adsorption*. CRC press.
- Bujdák, J. (2020). Adsorption kinetics models in clay systems. The critical analysis of pseudo-second order mechanism. *Applied clay science*, 191, 105630.
- Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review. *Bioresource technology*, 97(9), 1061-1085.
- Crini, G. ve Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 145-155.
- Cychosz, K. A., & Thommes, M. (2018). Progress in the physisorption characterization of nanoporous gas storage materials. *Engineering*, 4(4), 559–566.
- Çiçekçi, A., Dönmez, B., Kavcı, E., & Laçın, Ö. (2020). Malahit yeşilinin şeftali çekirdeği kabuğu üzerine adsorpsiyon izotermi ve termodinamiği. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 103-111.
- Dal, M. C. (2024). Modeling of the Linear Equations of Langmuir Isotherm in the Adsorption of Cd (II) Ion with Siirt Kurtalan Koçpınar Clay. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 13(3), 67-72.
- Dehghani, M. H., Zarei, A., Mesdaghinia, A., Nabizadeh, R., Alimohammadi, M., & Afsharnia, M. (2017). Adsorption of Cr(VI) ions from aqueous systems using thermally sodium organo-bentonite biopolymer composite (TSOBC): Response surface methodology, isotherm, kinetic and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*, 85, 298–312.
- Demir, E., & Yalçın, H. (2014). Adsorbentler: Sınıflandırma, özellikler, kullanım ve öngörüler. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 7(2), 70–79.
- Dilekoğlu, M. F., & Yapıcı, M. (2023). Çeşitli kimyasal reaktifler kullanılarak koyun gübresinden süper aktif karbon üretimi. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences (Anadolu Çevre ve Hayvancılık Bilimleri Dergisi)*, 8(3), 402–410.
- Dutta, S. K., Amin, M. K., Ahmed, J., Elias, M., & Mahiuddin, M. (2022). Removal of toxic methyl orange by a cost-free and eco-friendly adsorbent: Mechanism, phytotoxicity, thermodynamics, and kinetics. *South African Journal of Chemical Engineering*, 40, 195-208.
- El Meziani, S., Agnaou, H., El Haddaj, H., Boumya, W., Barka, N., & Elhalil, A. (2025). Sustainable adsorption technologies for textile dye removal: Advances in biomass-derived and magnetically modified activated carbons. *Cleaner Chemical Engineering*, 12, 100210.

- El-Azazy, M., El-Shafie, A. S., & Yousef, B. A.-S. (2021). Green tea waste as an efficient adsorbent for methylene blue: Structuring of a novel adsorbent using full factorial design. *Molecules*, 26(9), 1–18.
- Elgarahy, A. M., Elwakeel, K. Z., Mohammad, S. H., & Elshoubaky, G. A. (2021). A critical review of biosorption of dyes, heavy metals and metalloids from wastewater as an efficient and green process. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100209.
- El-habacha, M., Miyah, Y., Lagdali, S., Mahmoudy, G., Dabagh, A., Chiban, M., Sinan, F., laich, S., & Zerbet, M. (2023). General overview to understand the adsorption mechanism of textile dyes and heavy metals on the surface of different clay materials. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(11), 105248.
- El-Khaiary, M. I. (2008). Least-squares regression of adsorption equilibrium data: comparing the options. *Journal of Hazardous Materials*, 158(1), 73-87.
- Ergüt, M., & Özer, A. (2024). Effective adsorption of malachite green with silica gel supported iron–zinc bimetallic nanoparticles. *Turkish Journal of Engineering*, 8(3), 510–523.
- Fiol, N., & Villaescusa, I. (2009). Determination of sorbent point zero charge: Usefulness in sorption studies. *Environmental Chemistry Letters*, 7(1), 79-84.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical engineering journal*, 156(1), 2-10.
- Gayathiri, M., Pulingam, T., Lee, K. T., & Sudesh, K. (2022). Activated carbon from biomass waste precursors: Factors affecting production and adsorption mechanism. *Chemosphere*, 294, 133764.
- Girish, C. R. (2025). Determination of thermodynamic parameters in adsorption studies: A review. *Chemical Papers*, 79, 5687–5706.
- Gouda, S. A., & Taha, A. (2023). Biosorption of heavy metals as a new alternative method for wastewater treatment: A review. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 27(2), 135–153.
- Güneş, Ş. (2018). *Fonksiyonel Polimerlerle Sezyum İyonu Adsorpsiyonunun İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Habibi, B., Bahadori, Y., Pashazadeh, S., & Pashazadeh, A. (2025). ZIF-67 decorated with silica nanoparticles and graphene oxide nanosheets composite modified electrode for simultaneous determination of paracetamol and diclofenac. *Scientific Reports*, 15(1), 9499.
- Hamadi, A., Hammoudi, I., Finnouche, F., Kais, H., Yeddou-Mezenner, N., & Nekkaa, Z. (2026). Biomass-derived activated carbon from *Scolymus hispanicus*: Activation strategy and adsorption mechanism of hydroxychloroquine. *RSC Advances*, 16, 849–860.
- Haryanto, B., Nasution, I. T., Polem, A. F., Tambun, R., & Alexander, V. (2023). Natural adsorbent of corncob (*Zea mays* L.) powder capability in purification of used cooking oil with shaking operation based on turbidity. *Results in Engineering*, 19, 101233.
- Hira, N. e., Lock, S. S. M., Shoparwe, N. F., Lock, I. S. M., Lim, L. G., Yiin, C. L., Chan, Y. H., & Hassam, M. (2023). Review of adsorption studies for contaminant removal from wastewater using molecular simulation. *Sustainability*, 15(2), 1510.
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process biochemistry*, 34(5), 451-465.
- Huang, R., Liu, Q., Huo, J., & Yang, B. (2017). Adsorption of methyl orange onto protonated cross-linked chitosan. *Arabian Journal of Chemistry*, 10(1), 24-32.
- Isiuku, B. O., Ochule, B. I., Enedoh, M. C., & Ebosie, N. P. (2023). Application of kinetic models in batch adsorption processes—A review. *World Sci News*, 186, 67-93.

- İnce, M., & Kaplan İnce, O. (2017). An overview of adsorption technique for heavy metal removal from water/wastewater: a critical review. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 3(2), 10-19.
- Jodeh, S., Shawahny, M., Hanbali, G., Jodeh, D., & Dagdag, O. (2019). Efficiency of magnetic chitosan supported on graphene for removal of perchlorate ions from wastewater. *Environmental Technology*, 40, 1–12.
- Karaca, D. (2013). Atıksudan Bazik Boyar Madde Astrazon Blue Fgrl Giderimi. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Karakaş, M. (2019). Sulu Çözeltilerden Adsorpsiyon Yöntemi ile Cr(VI) Giderimi. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Kassa, A., Engida, A., & Endaye, M. (2025). Eco-friendly adsorbents for industrial dye removal: A comprehensive review of low-cost alternatives. *Desalination and Water Treatment*, 323, 101362.
- Khan, M., Shafi, M., Raza, J., Ahmed, I. A., Zada, A., Narasimharao, K., & Sun, X. (2025). Mechanistic breakthroughs in affordable adsorbents for heavy metal remediation: An in-depth exploration of next-generation sustainable water purification technologies. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 19, 100847.
- Khumalo, S. M., Bakare, B. F., & Rathilal, S. (2025). Single and binary adsorption of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonic acid on chitosan–carbon nanotubes hydrogel beads: Adsorption kinetics, isotherms, and thermodynamic parameters. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 11, 100288.
- Kosmulski, M. (2023). The pH dependent surface charging and points of zero charge. X. Update. *Advances in Colloid and Interface Science*, 319, 102973..
- Li, D., Li, J., Gu, Q., Song, S., & Peng, C. (2016). Co-influence of the pore size of adsorbents and the structure of adsorbates on adsorption of dyes. *Desalination and Water Treatment*, 57, 14686–14695.
- Liu, H., Dong, Y., Liu, Y., & Wang, H. (2010a). Screening of novel low-cost adsorbents from agricultural residues to remove ammonia nitrogen from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1–3), 1132–1136.
- Liu, H., Dong, Y., Wang, H., & Liu, Y. (2010b). Ammonium adsorption from aqueous solutions by strawberry leaf powder: Equilibrium, kinetics and effects of coexisting ions. *Desalination*, 263(1–3), 70–75.
- Longchar, I. T., Umdor, R. S., Sharma, S., & Sinha, D. (2026). Synthesis, characterization, and adsorption applications of graphene oxide/activated carbon composites for emerging contaminants in water: A comprehensive review. *Inorganic Chemistry Communications*, 183, 115856.
- Maceiras, R., Feijoo, J., Alfonsín, V., Alvarez-Feijoo, M. A., & Azofra, L. (2026). Enhanced CO<sub>2</sub> adsorption for hydrogen purification using calcined zeolite: Process analysis and kinetic study. *Microporous and Mesoporous Materials*, 399, 113869.
- Malik, R., Ramteke, D. S., & Wate, S. R. (2007). Adsorption of malachite green on groundnut shell waste based powdered activated carbon. *Waste Management*, 27(9), 1129–1138.
- Mamman, S., Abdullahi, S. S., Birniwa, A. H., Opaluwa, O. D., Okiemute, O., Mohammad, R. E. A., Suleiman, S. B., & Jagaba, A. H. (2024). Influence of adsorption parameters on phenolic compounds removal from aqueous solutions: A mini review. *Desalination and Water Treatment*, 320, 100631.
- Mopoung, S., Moonsri, P., Palas, W., & Khumpai, S. (2015). Characterization and properties of activated carbon prepared from tamarind seeds by KOH activation for Fe (III) adsorption from aqueous solution. *The scientific world journal*, 2015(1), 415961.
- Muinde, V., Onyari, J. M., Wamalwa, B. M., & Wabomba, J. (2017). Adsorption of malachite green from aqueous solutions onto rice husks: kinetic and equilibrium studies.

- Mustapha, S., Shuaib, D. T., Ndamitso, M. M., Etsuyankpa, M. B., Sumaila, A., Mohammed, U. M., & Nasirudeen, M. B. (2019). Adsorption isotherm, kinetic and thermodynamic studies for the removal of Pb (II), Cd (II), Zn (II) and Cu (II) ions from aqueous solutions using Albizia lebeck pods. *Applied water science*, 9(6), 142.
- Nath, J., Dewan, M., Ghosh, A., Ray, S. S., Orasugh, J. T., Lahiri, B., Chattopadhyay, D., & Adhikari, A. (2025). Chitosan-based adsorbents for remediation of toxic dyes from wastewater: A review on adsorption mechanism, reusability, machine learning based modeling and future perspectives. *International Journal of Biological Macromolecules*, 311, 143388.
- Nazri, M. K. H. M., & Sapawe, N. (2020). Removal of methyl orange over low-cost silica nanoparticles extrated from bamboo leaves ash. *Materials Today: Proceedings*, 31, A54-A57.
- Nthwane, Y. B., Fouda-Mbanga, B. G., Mnyango, J. I., Phiri, C., Nyoni, B., Hlangothi, S. P., Tywabi-Ngeva, Z., Makgopa, K., Ndibewu, P. P., & Pillay, K. (2025). End-use application of spent adsorbent from food waste: Perspective of the circular economy. *Results in Engineering*, 28, 108058.
- Okumuş, Z. Ç., & Doğan, T. H. (2019). Biyodizeldeki suyun reçine ile uzaklaştırılması: adsorpsiyon izotermi, kinetiği ve termodinamik incelemesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 561-570.
- Özbaş, E. E., Balçık, B., & Ozcan, H. K. (2019). Preparation of activated carbon from waste tires, and its use for dye removal. *Desalination and Water Treatment*, 172, 78-85.
- Özmetin, E., & Kocakerim, M. M. (2018). Removal of methylene blue dye from aqueous solutions by illite clay. *Desalination and Water Treatment*, 124, 279–286.
- Pehlivan, E. (2017). Meyve suyu endüstrisi katı atığından üretilen aktif karbonun sulu çözeltilerden reaktif kırmızı (procion red mx-5b) adsorpsiyonu için kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(7), 912-918.
- Prahas, D., Kartika, Y., Indraswati, N., & Ismadji, S. J. C. E. J. (2008). Activated carbon from jackfruit peel waste by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> chemical activation: Pore structure and surface chemistry characterization. *Chemical Engineering Journal*, 140(1-3), 32-42.
- Quan, B., Chi, D., Xia, G., Liu, X., Chen, W., & Wu, Q. (2025). Ball-milling tailored corn straw biochar: A dramatic shift from physical to chemical adsorption dominance for enhanced ammonia nitrogen removal in source-separated urine. *Industrial Crops & Products*, 235, 121751.
- Raganati, F., Miccio, F., & Ammendola, P. (2021). Adsorption of carbon dioxide for post-combustion capture: a review. *Energy & Fuels*, 35(16), 12845-12868.
- Rahmawati, M. A., Salam, A. N., Munte, W. N., Chitraningrum, N., & Rahmasari, L. (2025). Synthesis and characterization analysis of banana peel carbon activated as adsorption of copper (Cu). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(3), 647–657.
- Ramutshatsha-Makhwedzha, D., Mavhungu, A., Moropeng, M. L., & Mbaya, R. (2022). Activated carbon derived from waste orange and lemon peels for the adsorption of methyl orange and methylene blue dyes from wastewater. *Heliyon*, 8(8).
- Rápó, E., & Tonk, S. (2021). Factors affecting synthetic dye adsorption; desorption studies: A review of results from the last five years (2017–2021). *Molecules*, 26(17), 5419.
- Revellame, E. D., Fortela, D. L., Sharp, W., Hernandez, R., & Zappi, M. E. (2020). Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 1, 100032.
- Romero, L., Joglar, T., Oulego, P., Collado, S. ve Díaz, M. (2025). Valorisation of solid fraction from pretreated sewage sludge for cationic dye removal: mono-adsorbate and multi-adsorbate approach. *Journal of Environmental Management*, 391(126380), 1-13.

- Roy, S., Darabdhara, J., & Ahmaruzzaman, M. (2023). MoS<sub>2</sub> Nanosheets@ Metal organic framework nanocomposite for enhanced visible light degradation and reduction of hazardous organic contaminants. *Journal of Cleaner Production*, 430, 139517.
- Saadi, A. S., Ben Ali, D. S., & Bousba, S. (2025). Utilization of a biosorbent derived from plant residues for the treatment of water contaminated with rhodamine B: Preparation and characterization. *RSC Advances*, 15, 43038.
- Salman, T. A. (2017). Preparation of Sawdust and Sawdust Coated Polyaniline Composite for the Removal of Some Dyes From Industrial Bio-waste Water. (Yüksek Lisans Tezi). Al-Nahrain Üniversitesi, Fen Fakültesi, Bağdat.
- Sangoremi, A. A. (2025). Adsorption kinetic models and their applications: A critical review. *International Journal of Research and Scientific Innovation*, 12(5), 1–12.
- Sangoremi, A. A. (2025). Adsorption kinetic models and their applications: A critical review. *International Journal of Research and Scientific Innovation*, 12(5).
- Sarı, A. C. (2022). Sulu ortamdan polimer adsorbentle Bakır (II) ve Çinko (II) uzaklaştırılmasının incelenmesi]. (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Satyam, S. ve Patra, S. (2024). Innovations and challenges in adsorption-based wastewater remediation: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(8), e29573.
- Sayar, İ. (2025). Susam Küspesi Kullanılarak Metil Oranj Boyasının Giderimi: Adsorpsiyon Sürecinin Modellenmesi Ve Optimizasyonu. (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Saygılı, H. (2016). Yeni bir hammaddeden üretilmiş karbonlu malzemenin yapısal, morfolojik ve gözenek özellikleri üzerine çalışmalar. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(1), 245-252.
- Serban, G. V., Iancu, V. I., Dinu, C., Tenea, A., Vasilache, N., Cristea, I., ... & Chiriac, F. L. (2023). Removal efficiency and adsorption kinetics of methyl orange from wastewater by commercial activated carbon. *Sustainability*, 15(17), 12939.
- Shah, A., & Farooq, M. U. (2025). Critical review on adsorption of heavy metal ions from industrial wastewater. *Spectrum of Engineering Sciences*, 3(10), 57–68.
- Sharma, S., Balasubramanian, K., & Arora, R. (2016). Adsorption of arsenic (V) ions onto cellulosic-ferric oxide system: Kinetics and isotherm studies. *Desalination and Water Treatment*, 57(20), 9420–9436.
- Shilpa, M. P., Shetty, S. J., Bhat, S. S., Gummagol, N. B., Surabhi, S., Jeong, J. R., & Gurumurthy, S. C. (2025). Nonlinear Optical and Power Limiting Characteristics of Noble Metal Decorated Reduced Graphene Oxide and Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXene. *Carbon*, 120025.
- Sipahi, K. (2019). Tetraetilen Penta Amin (Tepa) Poliüre-Poliamin Polimeri İle Pd(II) İyonlarının Sulu Çözeltilerden Adsorpsiyonla Gideriminin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Sivamani, S., & Grace, B. L. (2009). Removal of dyes from wastewater using adsorption: A review. *International Journal of BioSciences and Technology*, 2(4), 47–51.
- Siyal, A. A., Radin Mohamed, R. M. S., Ahmad, F., Abdul Malek, M., Alsubih, M., Shamsuddin, R., Hussain, S., & Musa, S. (2025). A review of the developments in adsorbents for the efficient adsorption of ibuprofen from wastewater. *RSC Advances*, 15, 17843.
- Sonawane, M. R., Chhowala, T. N., Suryawanshi, K. E., Fegade, U., & Isai, K. A. (2025). Adsorption of MO dyes using various adsorbents: Past, present and future perspective. *Next Sustainability*, 6, 100153.
- Subarani, S., Sabhanayakam, S., & Kamaraj, C. (2013). Studies on the impact of biosynthesized silver nanoparticles (AgNPs) in relation to malaria and filariasis vector control against

- Anopheles stephensi Liston and Culex quinquefasciatus Say (Diptera: Culicidae). Parasitology research, 112, 487-499.
- Sukmana, H., Bellahsen, N., Pantoja, F. ve Hodur, C. (2021). Adsorption and coagulation in wastewater treatment - review. Progress in Agricultural Engineering Sciences, 17(1), 49-68.
- Sumardiono, S., Setiawan, F. K., Jos, B., & Cahyono, H. (2025). Photocatalytic adsorption-driven removal of rhodamine B by silver Tetratingstate-modified bentonite: Kinetic, isotherm, and thermodynamic analysis. Inorganic Chemistry Communications, 115616.
- Şencan, A. ve Çiftçi Yavuzarslan, M. Z. (2022). Nar kabuğundan elde edilen aktif karbon ile meyve suyundan pestisit adsorpsiyonu. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, 17(2), 577-588.
- Şencan, A., ve Çiftçi Yavuzarslan, M. Z. (2022). Nar kabuğundan elde edilen aktif karbon ile meyve suyundan pestisit adsorpsiyonu. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, 17(2), 577-588.
- Talebian, S., & Sagir, M. (2024). Adsorption behavior of in-house developed CO<sub>2</sub>-philic anionic surfactants. Scientific Reports, 14(1), 24500.
- Thakur, A., Assad, H., Kaya, S. & Kumar, A. (2022). Eco-friendly corrosion inhibitors: Principles, designing and applications. Elsevier, Netherlands.
- Tunali Akar, S., Çelik, S., Tunç, D., Yetimoğlu Balk, Y., & Akar, T. (2016). Biosorption potential of surface-modified waste sugar beet pulp for the removal of reactive yellow 2 (RY2) anionic dye. Turkish Journal of Chemistry, 40(6), 1044-1054.
- Ustama, Y.(2023).Gnetik Nanokiller Kullanılarak Metilen Mavisi Boyar Maddesinin Sulu Çözeltilerden Giderimi: Kinetik, Denge Ve Termodinamik Çalışmaları. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Sakarya.
- Villabona-Ortiz, Á., Tejada-Tovar, C., & González-Delgado, Á. (2025). Parametric evaluation of a packed adsorption column to remove Cr(VI) using Langmuir and Freundlich with (LDF) and (QDF). Desalination and Water Treatment, 321, 101023.
- Waisi, B. I., Al-Musawy, W. K., Ahmed, S. B., & Al-Furaiji, M. H. (2025). Design of porous activated carbon beads: Controlling size and structure for optimal dye adsorption. Desalination and Water Treatment, 324, 101533.
- Wang, K., Song, Z., Xu, Z., Xi, Y., Cui, Y., & Zhou, H. (2025a). Synthesis of quaternized magnetic chitosan and adsorption performance for methyl orange from aqueous solution. RSC advances, 15(26), 21121-21132.
- Wang, Y., Liu, Z., Chen, X., Sun, D., Sun, Y., Liu, L., Li, J., & Li, S. (2025b). Preparation of biomass activated carbon and its adsorption performance for anionic/cationic dyes (10 mg/L): A case study of coffee grounds, hemp stalks and macadamia nut shells. Next Materials, 9, 101258.
- Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review. Advances in colloid and interface science, 209, 172-184.
- Yaradoddi, J. S., Banapurmath, N. R., Ganachari, S. V., Soudagar, M. E. M., Sajjan, A. M., Kamat, S., ... & Ali, M. A. (2022). Bio-based material from fruit waste of orange peel for industrial applications. Journal of Materials Research and Technology, 17, 3186-3197.
- Yıldız, H. (2024). Atıksudan boya giderimindeki gelişmeler: Adsorpsiyon teknolojisi ve geleceğe yönelik beklentiler. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(4), 1544-1556.
- Yousef, R., Qiblawey, H., & El-Naas, M. H. (2020). Adsorption as a process for produced water treatment: A review. Processes, 8(12), 1657.

Zhu, L., Cheng, H., Ma, J., Kong, Y., Qin, Y., & Komarneni, S. (2020). Decolorization of methyl orange by MnO<sub>2</sub>/organic acid system: The role of Mn (III). *Materials Research Bulletin*, 122, 110670.