



**T.C.**  
**NECMETTİN ERBAKAN**  
**ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**KİMYASAL AKTİVASYON YÖNTEMİ İLE**  
**ÜRETİLMİŞ OLAN ÇEŞİTLİ AKTİF**  
**KARBONLARIN ADSORPSİYON**  
**KAPASİTELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**  
**ÜZEYİR YALMAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**TEMMUZ-2025**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Üzeyir YALMAN tarafından hazırlanan “Kimyasal Aktivasyon Yöntemi İle Üretilmiş Olan Çeşitli Aktif Karbonların Adsorpsiyon Kapasitelerinin Karşılaştırılması” adlı tez çalışması 08/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE

.....

#### Danışman

Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL

.....

#### Üye

Doç. Dr. İlker ÖRS

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun ....../.../2025 gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY  
FBE Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Üzeyir YALMAN

Tarih:22.07.2025

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# KİMYASAL AKTİVASYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ OLAN ÇEŞİTLİ AKTİF KARBONLARIN ADSORPSİYON KAPASİTELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

ÜZEYİR YALMAN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL

2025, 84 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL  
Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE  
Doç. Dr. İlker ÖRS

Evsel, sanayi vb. sektörlerin atıksularının doğaya zarar vermeden kullanılması gittikçe önemli hale gelmiştir. Kullanmış olduğumuz ve atıksu haline gelmiş olan suların geri kullanımı ya da doğaya zarar vermeyecek şekilde doğaya salınması önem arz etmektedir. Bu çalışmada atıksu tesisi girişinden alınan numuneler üzerinde kimyasal aktivasyonla üretilmiş olan 5 farklı aktif karbon ile 2 dakika 150 devir/dak, 20 dakika 40 devir/dak karıştırılıp 60 dakika bekletilerek deneyler yapılmıştır. Hazırlanan bu numuneler üzerinde Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), pH, elektrik iletkenliği, bulanık ve renk değerlerinin tespiti için deneyler yapılmıştır. Ayrıca Yüzey Analiz ve Porozite (BET), yoğunluk, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) analizi, Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskopi (FE-SEM) görüntüleri yorumlanmıştır. Yüzey analiz sonuçlarına göre yüzey alanı en geniş olan OT (Karakavak Tuz) numunesidir. Bunları sırasıyla OA (Karakavak Asit), AKT (Atık Kağıt Tuz), AKA (Atık Kağıt Asit) ve hazır aktif karbon izlemiştir. Gözenek hacim analizine göre mikro gözenekler arası sıralama yapıldığında hazır aktif karbon (% 63), OA (% 69), OT (% 84), AKA (% 74) ve AKT (% 91) numunelerinde olduğu görülmüştür. FE-SEM görüntüleri incelendiğinde, numunelerin yüzeylerinde farklı gözenek yapıları ve morfolojik özellikler olduğu görülmektedir. OA ve OT numuneleri incelendiğinde daha belirgin net bir şekilde gözeneklerin oluştuğunu ve daha homojen bir şekilde dağıldığı görülürken, hazır aktif karbon AKT ve AKA numunelerinde daha az belirgin makro gözenekler ortaya koymuştur. Aktif karbonların yoğunluk analizleri incelendiğinde, gözeneklilik oranı ile yoğunluk arasında ters bir ilişki olduğu görülmüştür. En düşük yoğunluğa sahip numune OT iken, bunu sırasıyla OA, AKA, AKT ve hazır aktif karbon numuneleri takip etmiştir. Atıksu arıtımı çalışmaları, OT numunesinin KOİ gideriminde % 19, bulanıklık gideriminde % 61 ve renk gideriminde % 13 ile en yüksek verimi sağladığını göstermiştir. OA ve AKA numunelerinde adsorpsiyon kapasitesinin düşük olması, fosfat türlerinin gözenekleri tıkanmasıyla ilişkilidir. Bununla birlikte, pH ve elektrik iletkenliği değerlerinde tüm numunelerde anlamlı bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu çalışma sonuçları, çinko klorür ile aktivasyonun mikro ve mezo gözenek yapısını geliştirmede fosforik aside kıyasla daha etkili bir yöntem olduğunda ortaya koymuştur. Özellikle OT numunesi, yüksek mikro gözenekliliği ve geniş yüzey alanı sayesinde atıksu arıtımı için en uygun numune olarak öne çıkmıştır. Bu bulgular, aktif karbon üretiminde kullanılan aktivasyon ajanlarının ve süreç parametrelerinin malzeme özellikleri üzerindeki kritik etkisini bir kez daha göstermiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında atık ürünlerin daha ekonomik ürünlere dönüşmesi sağlanmış olup üretilen aktif karbonların ticari aktif karbonlara kıyasla daha kullanılabilir olduğu ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Adsorpsiyon, Aktif Karbon, Atıksu, Bulanıklık, Kimyasal Aktivasyon, Kimyasal Oksijen İhtiyacı

## ABSTRACT

### MS THESIS

## COMPARISON OF THE ADSORPTION CAPACITIES OF VARIOUS ACTIVE CARBONS PRODUCED BY CHEMICAL ACTIVATION METHOD

Üzeyir YALMAN

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY  
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Şaban BÜLBÜL

2025, 84 Pages

Jury

Assoc.Prof.Dr. Şaban BÜLBÜL  
Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE  
Assoc. Prof. Dr. İlker ÖRS

The use of wastewater from domestic, industrial, and other sectors without harming the environment has become increasingly important. It is crucial to reuse used wastewater or release it back into the environment in a manner that does not harm the environment. In this study, experiments were conducted on samples taken from the inlet of a wastewater plant using five different activated carbons produced through chemical activation: mixing for 2 minutes at 150 rpm, 20 minutes at 40 rpm, and then holding for 60 minutes. Experiments were conducted on these prepared samples to determine Chemical Oxygen Demand (COD), pH, electrical conductivity, turbidity, and color values. Additionally, Surface Analysis and Porosity (BET), density, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) analysis, and Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) images were interpreted. According to the surface analysis results, the OT (Karakavak Salt) sample had the largest surface area. These were followed by OA (Black Oak Acid), AKT (Waste Paper Salt), AKA (Waste Paper Acid), and prepared activated carbon, respectively. When micropores were sorted according to pore volume analysis, it was seen that these were present in prepared activated carbon (63%), OA (69%), OT (84%), AKA (74%), and AKT (91%) samples. When FE-SEM images were examined, it was seen that the samples had different pore structures and morphological features on their surfaces. When OA and OT samples were examined, it was seen that pores were more clearly formed and more homogeneously distributed, while prepared activated carbon AKT and AKA samples revealed less pronounced macropores. When the density analyzes of activated carbons were examined, it was observed that there was an inverse relationship between porosity ratio and density. OT had the lowest density sample, followed by OA, AKA, AKT, and prepared activated carbon samples, respectively. Wastewater treatment studies showed that the OT sample provided the highest efficiency in COD removal with 19%, turbidity removal with 61%, and color removal with 13%. The low adsorption capacity in the OA and AKA samples was related to pore blockage by phosphate species. However, no significant changes were observed in pH and electrical conductivity values in all samples. The results of this study also demonstrated that activation with zinc chloride is a more effective method than phosphoric acid in improving micro- and mesoporous structures. The OT sample, in particular, stood out as the most suitable sample for wastewater treatment due to its high microporosity and large surface area. These findings once again demonstrated the critical impact of the activation agents and process parameters used in activated carbon production on material properties. Furthermore, this study enabled the transformation of waste products into more economical products, and demonstrated that the produced activated carbons are more usable compared to commercially available activated carbons.

**Keywords:** Adsorption, Activated Carbon, Wastewater, Turbidity, Chemical Activation Chemical Oxygen Demand

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans ve tez dönemi boyunca bilgi ve tecrübesini esirgemeyen, danışmanım Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL'e içtenlikle teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam sırasında maddi manevi desteğini esirgemeyen canım eşime, deneylerde kullandığım numuneleri hazırlamada bana yardım eden Abdi Bozkurt GÜRHAN'a, her türlü bilgi ve manevi destekleri için Fadime MERDANE'ye, Esra ve Burak YÜCEER'e teşekkürü borç bilirim.

Üzeyir YALMAN  
KONYA-2025

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ.....</b>	<b>ix</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. AKTİF KARBON .....</b>	<b>3</b>
2.1. Aktif Karbonun Tarihçesi .....	3
2.2. Aktif Karbonun Tanımı .....	5
2.3. Aktif Karbonun Özellikleri .....	5
2.3.1. Yüzey alanı .....	6
2.3.2. Gözenek hacmi .....	7
2.3.3. Adsorpsiyon .....	9
2.4. Aktif Karbon Türleri .....	10
2.4.1. Toz aktif karbonlar .....	10
2.4.2. Granül aktif karbonlar .....	11
2.4.3. Pellet aktif karbonlar .....	12
2.4.4. Küresel aktif karbonlar .....	12
2.4.5. Emperye aktif karbonlar .....	13
2.4.6. Polimer kaplanmış aktif karbonlar .....	13
2.5. Aktif Karbon Üretiminde Kullanılabilen Hammaddeler .....	13
2.6. Aktif Karbon Üretim Yöntemleri .....	14
2.6.1. Kül giderimi .....	15
2.6.2. Karbonizasyon .....	16
2.6.3. Piroliz .....	17
2.6.4. Aktivasyon .....	17
2.7. Aktif Karbonun Uygulama Alanları .....	20
2.7.1. Gaz fazı uygulamaları .....	21
2.7.2. Sıvı faz uygulamaları .....	22
2.8. Adsorpsiyon ve Türleri .....	24
2.8.1. Fiziksel adsorpsiyon .....	24
2.8.2. Kimyasal adsorpsiyon .....	25
2.8.3. İyonik adsorpsiyon .....	25
2.9. Adsorpsiyon İzotermi .....	26
2.9.1. Freundlich izotermi .....	26
2.9.2. Langmuir izotermi .....	27

2.9.3. Brunauer-emmett-teller (BET) izotermi .....	28
2.10. Adsorpsiyon Kinetiği .....	28
2.10.1. Sözde birinci mertebeden kinetik model .....	29
2.10.2. Sözde ikinci mertebeden kinetik model .....	29
<b>3. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>31</b>
3.1. Aktif Karbon Üretimi ve Kullanımı İle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	31
3.2. Aktif Karbon İle İlgili Adsorpsiyonu Çalışmaları .....	33
<b>4. MATERYEL VE YÖNTEM.....</b>	<b>45</b>
4.1. Aktif Karbon Üretimi.....	45
4.1.1. Fosforik asit ile aktif karbon üretimi .....	46
4.1.2. Çinko klorür ile aktif karbon üretimi .....	46
4.2. Yapılan Deneysel Çalışma .....	46
4.2.1. Yüzey analizi ve porozite (BET) analizi.....	47
4.2.2. Alan taramalı elektron mikroskobu ile görüntüleme ( FE-SEM ) .....	47
4.2.3. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi ( FT-IR ) .....	48
4.2.4. Yoğunluk ölçümleri .....	49
4.2.5. Adsorpsiyon deney işlemleri .....	49
<b>5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>51</b>
5.1. BET Analizi Deney Sonuçları .....	51
5.2. FE-SEM Görüntüleri.....	52
5.3. FT-IR Analizi Sonuçları .....	54
5.4. Yoğunluk Analizleri .....	57
5.5. Adsorpsiyon Deneyi Sonuçları .....	57
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>60</b>
6.1 Sonuçlar .....	60
6.2 Öneriler .....	62
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>63</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Aktif karbon dünya ihracatı pazar payları.....	4
Şekil 2.2. Türkiyede yıllara göre ithalatı-ihracatı.....	4
Şekil 2.3. Aktif karbonun gösterimi .....	7
Şekil 2.4. Aktif karbonun mikro gözenek ve makro gözenek yapısı.....	8
Şekil 2.5. Aktif karbonun yapısı.....	9
Şekil 2.6. Toz (PAC) aktif karbon.....	11
Şekil 2.7. Granül (GAC) aktif karbon. ....	12
Şekil 2.8. Pellet aktif karbon .....	12
Şekil 2.9. Aktif karbonun üretim şeması. ....	15
Şekil 2.10. Fiziksel aktivasyon akım şeması. ....	18
Şekil 2. 11. Kimyasal aktivasyon ile aktif karbon üretim akış şeması. ....	20
Şekil 2.12. Aktif karbonun gaz faz uygulama alanları. ....	22
Şekil 2.13. Sıvı faz uygulama alanları.....	24
Şekil 4.1. Atık kâğıt ve Karakavak odun talaşından aktif karbon üretim şeması.....	45
Şekil 4.2. a) Etüv b) Manyetik karıştırıcı c) Öğütücü makinesi d) Tav fırını.....	45
Şekil 4. 3. Quantachrome – Quadrasorb Evo 4. ....	47
Şekil 4.4. LEICA EM ACE600 model kaplama cihazı. ....	48
Şekil 4.5. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskop cihazı.....	48
Şekil 4.6. Thermo scientific/nicolet IS 20 FT-IR cihazı.....	49
Şekil 4.7. Gaz piknometre ünite sistemi. ....	49
Şekil 4.8. a) Jar cihazı b) Hassas terazi.....	50
Şekil 5. 1. Hazır aktif karbon numunesi b) AKA numunesi c) AKT numunesi d) OA numunesi e) OT numunesi FE-SEM görüntüleri.....	53
Şekil 5.2. FT-IR analiz sonuçları.....	55

## TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Aktif karbon için kullanılabilen hammaddeler. ....	14
Tablo 2.2. Kimyasal aktivasyonda kullanılan kimyasal maddeler.....	19
Tablo 5.1. BET analizi deney sonuçları. ....	51
Tablo 5 2. Yoğunluk analizi sonuçları. ....	57
Tablo 5.3. Adsorpsiyon deneyi sonuçları.....	57

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

Å	:Angström
H <sub>2</sub>	:Hidrojen
N <sub>2</sub>	:Azot
NH <sub>3</sub>	:Amonyak
CO <sub>2</sub>	:Karbondioksit
SO <sub>2</sub>	:Kükürtdioksit
C	:Karbon
K	:Kelvin
ZnCl <sub>2</sub>	:Çinko Klorür
KOH	:Potasyum Hidroksit
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	:Fosforik Asit
NaOH	:Sodyum Hidroksit
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	:Potasyum Karbonat
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	:Aseton
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	:İzopropanol
C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	:Tetrakloretilen
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	:Benzen
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	:Etanol
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	:Etil Asetat
(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O	:Etil Eter
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	:Ksilen
CH <sub>3</sub> OH	:Metanol
CH <sub>3</sub> COOCH <sub>3</sub>	:Metil Asetat
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	:Toluen
C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>	:Triklorüretilen
ZnO	:Çinkooksit
CR ( VI )	:Hekzavalent Krom
HNO <sub>3</sub>	:Nitrikasit
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	:Hidrojen Peroksit
CO ( II )	:Kobalt Oksit
PB ( II )	:Kurşun Oksit
CU ( II )	:Bakır Oksit
CD ( II )	:Kadmiyum Oksit
k <sub>2</sub>	:Sözde İkinci Mertebeden Kinetil Model Reaksiyon Sabiti
C <sub>2</sub>	:Sözde İkinci Mertebeden Kinetil Model İntegrasyon Sabiti
k <sub>1</sub>	:Sözde Birinci Mertebeden Kinetil Modele Ait Hız Sabiti
C <sub>1</sub>	:Sözde Birinci Mertebeden Kinetil Modele İntegrasyon Sabiti
q <sub>t</sub>	:t süresinde adsorplanan madde miktarını gösterir (mg/g)
V <sub>micro</sub>	:Micro gözenek sayısı (cm <sup>3</sup> /g)
V <sub>mezo</sub>	:Mezo gözenek sayısı (cm <sup>3</sup> /g)
V <sub>total</sub>	:Toplam gözenek sayısı (cm <sup>3</sup> /g)

ml	Mililitre ( bir litrenin binde biri )
mg	:Miligram ( bir gramın binde biri )
g	:Gram ( kilogramın binde biri )
mmol	:Molar konsantrasyon ( milimol/litre veya milimolar )
Ph	:Asitlik veya bazlık derecesini tarif eden ölçü birimi
$C_e$	:Langmuir İzotermi Çözeltinin Konsantrasyonunu
$\theta$	:Langmuir İzotermi Adsorbanın kapladığı kesiri
(1- $\theta$ )	:Langmuir İzotermi Adsorbanın kaplayamadığı kesiri
$k_a$	:Langmuir İzotermi adsorpsiyonun hız sabiti
$k_d$	:Langmuir İzotermi desorpsiyon sabiti
$q_m$	:Langmuir İzotermi tek tabadaki adsorbanın kapasite miktarını
$q_e$	:Langmuir İzotermi denge halindeki adsorplanmış miktar
ppm	:Derişim birimi ( 1ppm = 10 mg /1litre )
$q_e$	:Freundlich izotermi adsorban miktarı (mol/g)
$C_e$	:Freundlich izotermi adsorban konsantrasyonu (mol/L)
$K_F$	:Freundlich sabiti
N	:Freundlich sabiti
P/P0	:Brunauer-Emmett-Teller (BET) izotermi bağıl denge basıncı
C/C0	:Brunauer-Emmett-Teller (BET) izotermi bağıl denge derişimi
$n_m$	:Brunauer-Emmett-Teller (BET) izotermi tek tabaka kapasitesi
°C	:Sıcaklık derecesi birimi
NO <sub>x</sub>	:Azot oksitler
SO <sub>x</sub>	:Kükürt oksitler
Ntu	:Nefelometrik Bulanıklık Birimi

### Kısaltmalar

KOİ	:Kimyasal Oksijen İhtiyacı
OA	:Karakavak Asit
OT	:Karakavak Tuz
AKA	:Atık Kâğıt Asit
AKT	:Atık Kâğıt Tuz
BOİ	:Biyolojik Oksijen İhtiyacı
GAC	:Granül Aktif Karbon
DOM	:Doğal Organik Madde
RSM	:Tepki Yüzey Metodolojisi
P2RFL	:Setapers Sarı Kahverengi
RSB	:Synozol Blue Reaktif
HDN	:Amonyak İle İşlenmiş
HDFe	:Kütle Bazında Demir Emdirilmiş
3R ( RBO3R )	:Remazol Brilliant Orange

ADP	:Karbonize Hurma ekirdeęi
ARH	:Pirinç Kabuğu
CAC	:Ticari Aktif Karbon
MF	:Mikrofiltrasyon
SMX	:Sulfametoksazol
BMAC	:Bambu Atıklarından Aktif Karbon
MTBE	:Metil Tersiyer Bütül Eter
TCE	:Triklor Eten
MIB	:2 Metilizoborneol
EDTA-4NA	:Edetat tetrasodyum

## 1. GİRİŞ

Gıda sanayisinin üretiminden başlayarak son aşaması tüketim aşamasına gelene kadar çok miktarda katı atık meydana gelmektedir. Türkiye de ve dünyada gıda işletmesinin kurulması ile beraber oluşan atık miktarında gözle görülür bir şekilde olan artışlar hem ülkemizde hem de dünyada büyük çevre sorunlarını meydana getirmiştir (Şener ve Ünal, 2008). Bunun yanı sıra çevre sorunları ile beraber işletmelerin maliyetlerinde artışlara sebep olan problemler ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu nedenle bu atıklardan meydana gelen büyük çevre sorunları üzerine farklı ülkeler kendi atık yönetimi sistemlerini geliştirilmesi zorunluluğu oluşmuştur (Yaman, 2012). Birçok tesiste işleme sürecinde oluşan bu yan ürünler atık yönetiminde bazı problemleri oluşturmaktadır (Özyılmaz, 2023). Bu aşamada ortaya çıkan her atık madde çevreye zararlı olmamakla beraber bazı atıklar ürünlere özgü olup, bazı organik bileşenleri içerdiğinden yararlı olarak kabul edilmektedir. Bundan dolayı oluşan bu atık maddelerin ekonomiye ve çevreye yeniden kazandırılması çok önemli bir hal almıştır (Russ ve Schnappinger, 2007).

Aktif karbonlar, yüksek gözenekliliğe sahip olması ve iyi bir adsorban olmasından dolayı endüstri ve günlük hayatımızın birçok alanında kullanılır (Roy, 2023). İçmesuyu arıtma tesislerinde kokunun giderilmesi, suyun içinde bulunan kirlilik derecesini kontrol etme gibi farklı amaçlarla kullanılırlar (Balçık vd., 2020). Yüzey alanları genel olarak 400-1600 m<sup>2</sup>/g, gözenek hacimleri ise 30 m<sup>3</sup>/100 g'dan fazla, gözenek genişlikleri ise 0,3 nm-1000 nm arasında olması beklenmektedir (Zeyrek, 2019). Karbonca zengin olan her türlü maddeden aktif karbon üretimi yapılabilir. Genel olarak birçok organik ve inorganik atık malzemelerden (kömürler, kemikler, fındık, zeytin çekirdeği, palmye kabuğu, kestane ağacı, petrol artıkları ve hindisandan cevizi kabukları, odun artıkları, kaysı çekirdekleri, selulozik malzemeler, badem kabukları, portakal kabukları v.b.) maddelerden üretilen aktif karbonlar ticari amaçla üretilirler ve kullanılırlar (Adinata vd., 2007; Gomez-Serrano vd., 2005; Guritno vd., 2016; Hashemian vd., 2014; Hayashi vd., 2002; Kirubakaran vd., 1991; Küçükgül, 2004; Mozammel vd., 2002; Yavuz vd., 2010). Kullanılan hammaddenin ucuz, bol ve teminin kolay olması aktif karbonların ekonomik niteliğiyle doğrudan bağlantılıdır (Özyılmaz, 2023; Shah vd., 2023). Son zamanlarda gıda endüstrisinde çeşitli çalışmalarla bazı atıkların aktif karbon üretiminde kullanıldığı ve üretilen bu aktif karbonun çeşitli amaçlarda da kullanıldığını göstermiştir (Mohd Radhuwan vd., 2024). Nanobilim, elektrokimya gibi alanlarda da yapılmış olan çeşitli

çalışmalardan edinilen bilgilerde elektrokimyasal özelliğe sahip gıda sensörleri ve elektromanyetik özelliğe sahip aktif karbonlar üretimi yapılabilmektedir (Balçık vd., 2020).

Bu çalışmanın amaçlarından biri, tek başına katma değeri çok düşük olan atık kâğıt ve karakavak odun talaşı atıklarının katma değeri daha yüksek olan aktif karbonlara dönüştürmektir. Çalışmanın ikini amacı ise kimyasal aktivasyon üretim yöntemi ile üretilen bu aktif karbonlardan hangi aktivasyon ajanının ( çinko klorürü ve fosforik asit ) daha iyi olduğunu belirlemek ve ticari aktif karbonlar ile kıyaslama yaparak hangi aktif karbonun daha avantajlı olacağını belirlemektir. Çalışmanın bir diğer amacı ise üretilmiş olan ve piyasadan hazır temin edilen aktif karbonların adsorpsiyon kapasitelerinin belirlemektir.

Bu çalışma kapsamında giriş bölümünde tezde anlatılacak konuların özeti, amacı ve hedefleri açıklanmıştır. Tezin ikinci bölümünde ise aktif karbonun tanımı, özellikleri, tarihi, uygulama alanları vb konular hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde ise aktif karbonların üretimi ve adsorpsiyonu ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir. Dördüncü bölümde ise aktif karbonların üretim yöntemleri, yapılacak olan deneyler ve metodlar hakkında bilgi verilmiştir. Beşinci bölümde yapılan deneyler sonucunda ortaya çıkan verilerin bilgileri ve yorumlanması yer almaktadır. Son bölüm olan altıda ise sonuçları ve önerileri içermektedir. Böylece bu çalışma kapsamında Hindistan cevizinden üretilmiş aktif karbon, karakavak odun talaşı ve atık kağıtdan üretilen aktif karbonlarda BET yüzey analizi, FT-IR, FE-SEM, yoğunluk analizleri yapıldı ve incelendi. Ayrıca üretilen bu aktif karbonlar ve temin edilen aktif karbonun adsorpsiyon kapasitelerinin belirlenmesi için atıksu numuneleri üzerinde adsorpsiyon deneyleri yapılarak sonuçları bir birleriyle karşılaştırılmıştır.

## 2. AKTİF KARBON

Aktif karbon, yüksek yüzey alanına sahip ve çeşitli uygulamalarda kullanılan bir karbon formudur.

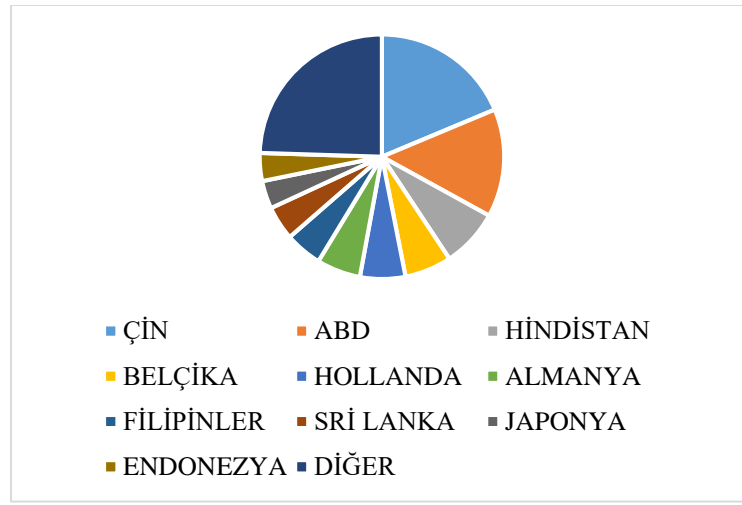
### 2.1. Aktif Karbonun Tarihçesi

Karbon elementi doğada daha az oranda bulunurken canlı bünyesinde fazla miktarda bulunmaktadır. Karbon elementinin doğada bulunma şekli üç izotop (11C, 12C, 13C) şeklindedir (Işık, 2012). Aktif karbonun ilk ne amaçla kullanıldığına dair bir bilgi bulunmamasına rağmen Mısırlıların ve Sümerlilerin kullanıldığı bilinmektedir (Inglezakis ve Pouloupoulos, 2006; Menéndez-Díaz ve Martín-Gullón, 2006; Smisek ve Cerny, 1970). Bronzun üretimi sırasında bakır, kalay ve çinkonun indirgemesinde onun kömürünün kullanıldığı bilinmektedir (Arpacı vd., 2023). Tıp alanında uygulamaları ise Mısırdan görülmüştür. Tıp alanında suyun tadı, koku giderimi gibi suyun kullanılmadan önce filtre edilerek tüketilmesi gerektiğini Hipokrat ve Piliny öneride bulunmuşlardır (Menéndez-Díaz ve Martín-Gullón, 2006). Farklı çalışmalarda suyun içinde renk giderimi işlemi içinde kullanılmıştır (Okman vd., 2014).

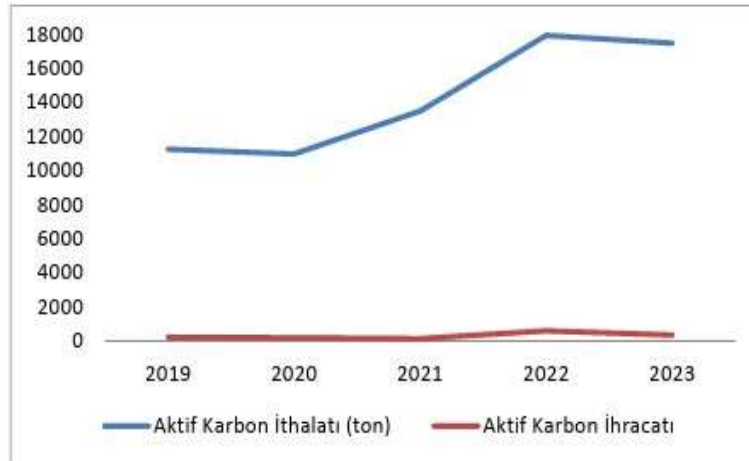
Kayser tarafından gazın çar ile tutunması ortaya çıkarmak amacıyla kullanmıştır. 1. Dünya savaşı sırasında askerleri ve insanları zehirli olan gazlardan korunması için gaz maskelerinde kullanılması yönelik farklı yöntemler denenmeye gerek duyulmuştur (Berg, 1998; Kibbey ve Hayes, 1993). Chaney Hindistan cevizinden Amerika da basınç kaybını engelleyerek zehirli gazların insanlara zarar vermeden uzaklaştırılmasını sağlayan aktif karbon üretmiştir. Savaşların bitmesi ile değişik maddelerden aktif karbon üretimleri olmuştur (Chaney vd., 1923). Mekanik dirençleri, gaz ve buhar adsorpsiyon kapasiteleri yüksek üretimler gerçekleşmiştir. Günümüzde çeşitli atıklardan üretilen aktif karbonlar içmesuyu arıtma tesisleri, içmesuyu havzalarının korunması, hastane vb. yerlerde ihtiyaç olan temiz gazların ve değerli kimyasal ürünlerin atık durumundan çıkarılarak tekrar kullanılması gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Şamdan, 2013).

2019 yılında Türkiye aktif karbon ihracatında 22. sırada yer alarak dünyadaki ihracattan %0,4 gerçekleştirmiş olup, Türkiye'nin aktif karbon ihracatı önümüzdeki yıllarda %60 oranında artacağı düşünülmektedir (Orta Anadolu Kalkınma Ajansı, 2021).

Aktif karbonun küreselpazar değeri 2023 yılında 5 milyar ABD dolarını aşmış durumdadır (Helvacı ve Korkmaz, 2024). Türkiye'de ise aktif karbon pazarı 38 milyon dolar civarında gerçekleşmiş olup 35 milyon dolar ticaret açığı meydana getirmiştir (Trade Map t.y.). Aktif karbon pazarının 2025 yılında 4,58 milyar dolara ulaşması ve 2026 yılında 6,11 milyar dolara ulaşması, ayrıca 2025 yılında en büyük pazar payına Asya Pasifik bölgesi sahip olması beklenmektedir (mordorintelligence t.y.). Kullanım alanına göre ise 2031 yılında su arıtma segmenti en fazla pazar payına sahip olması beklenmektedir (Kingsresearch t.y.). Şekil 2.1'de aktif karbon dünya ihracat pazarı payları, şekil 2.2'de aktif karbonun Türkiye'nin yıllara göre ithalatı ihracatı gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Aktif karbon dünya ihracatı pazar payları (Orta Anadolu Kalkınma Ajansı, 2021)



Şekil 2.2. Türkiye'de yıllara göre ithalatı-ihracatı (Trade Map t.y.)

## 2.2. Aktif Karbonun Tanımı

Genel hatlarıyla aktif karbon tanımlamak istersek eğer, büyük kristal formu ve oldukça geniş iç gözenek yapısına sahip olan aktif karbon, karbonlu adsorbanların tanımlanmasında kullanılmaktadır (Gerçek, 2015). Aktif karbonlar, insan sağlığına ve çevreye karşı herhangi bir zarar vermeyen, oldukça kullanışlı malzemelerdir. Aktif karbonun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyi olmasından dolayı hem endüstri olsun hem de güncel yaşamımızda pek çok uygulamada yer almaktadır (Balçık vd., 2020). Ancak aktif karbonun yapısını tanımlayan bir formülü bulunmamaktadır (Özdemir, 2009). Aktif karbonun gözenek hacmi genel olarak 0,2ml/g'dan yüksek ve iç yüzey alanları 400 m<sup>2</sup> den oldukça fazladır. Gözenek çapları ise 3 Å ile 1000 Å arasında olmaktadır (Oğuz, 2013).

Yapısında üretim yapılabilecek kadar karbon olan her maddeden aktif karbon üretilebilir. Aktif karbonun üretiminde en fazla kullanılan maddeler başında kömür, odun, meyve çekirdeği ve kabukları, Hindistan cevizi ve portakal kabukları gibi doğada bulunan hammaddeler dışında belirli polimer esaslı sentetiklerden de üretimi yapılmaktadır (Bouchelta vd., 2008; Demiral ve Gündüzoğlu, 2010; Toles vd., 1996). Aktif karbon üretiminde kömür kullanılması durumunda hammaddenin kalitesi, mineral çeşitleri, kükürt içeriği ve maliyetleri gibi özellikler hammadde seçiminde kriter olmaktadır (Elbinsoy, 2016).

## 2.3. Aktif Karbonun Özellikleri

Yüzey alanı, gözenek hacmi, adsorpsiyon gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri ile karakterize edilirler. Hammadeleri farklı olan malzemelerden üretilen aktif karbonlar, işlem aşaması ve üretildikleri ham maddenin özelliklerine bağlı olarak fiziksel özelliklerinde değişiklik gösterirler (Bolgaz, 2008). Karbona adsorplama özelliklerini kazandırarak aktif karbon kalitesini önemli derecede etkileyen fiziksel özelliklerinden biride karbonun mikro veya mezo gözenek boyutlarında olmasıdır (Bozbeyoğlu, 2020).

### 2.3.1. Yüzey alanı

Üretilmiş olan aktif karbonun karakterize edildiğinde fiziksel özelliklerinden en önemlisi aktif karbonun yüzey alanıdır.

Aktif karbon porozitesi ölçümü, aktif karbonun içindeki gözeneklerin boyutu, şekli ve dağılımını belirlemek için yapılır. Aktif karbon porozitesi ölçümünde Azot adsorpsiyon yöntemi (BET yöntemi), Karbon dioksit adsorpsiyon yöntemi ve Mercurim porozimetre yöntemi olarak söylenebilir. Yüzey alanı hesaplanırken kullanılan yöntem de sonuçları etkileyebilir. BET ve Langmuir yöntemleri, yüzey alanı hesaplamasında en yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir (Brunauer vd.,1938; Gregg ve Sing, 1982; Langmuir, 1918; Sing vd., 1985). Ancak bu yöntemler, adsorbanın farklı özelliklerine bağlı olarak farklı sonuçlar verebilirler.

Yüzey alanı, en bilindik analiz yöntemi olan BET (Brunauer-Emmet-Teller) yöntemi ile hesaplanır. BET yönteminde numune yüzeyini tek bir moleküler tabaka ile kaplamak için gerekli gaz miktarını tayin etmekte ve Brunauer Emmett ve Teller teorisini kullanarak yüzey alanını hesaplamaktadır (Brunauer vd.,1938). Azot gazı (N<sub>2</sub>) yardımıyla yüzey alanı ölçülür. Bundan farklı olarak BET yüzey alanının belirlenmesinde metilen sorpsiyon testleri ve sıvı faz fenol yöntemide kullanılır (Özyılmaz, 2023). Genellikle 300-2000 m<sup>2</sup>/g arasında aktif karbonun yüzey alanları değişmektedir. Bununla beraber 3500-5000 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip ve sentetik esaslı aktif karbonlar oldukça yüksek adsorpsiyon özelliklerinden dolayı özel alanlarda kullanılır (Schmidt, 1998). Bazı maddeleri kendine çekebilmesi ve geniş bir yüzey alanına sahip olması aktif karbonların tercih edilme nedenlerindedir.

Aktif karbonun yüzey alanı, birçok faktöre bağlıdır ve karbonun kullanım alanına göre farklılık gösterir. Örneğin su arıtımı için kullanılan aktif karbonun yüzey alanı, havadaki koku giderme için kullanılan aktif karbondan daha düşük olabilir. Bu sebepten dolayı, kullanım alanına bağlı olarak aktif karbonun yüzey alanı önemli bir rol üstlenmektedir(Czernik ve Bridgwater, 2004; Gregg ve Sing, 1982).

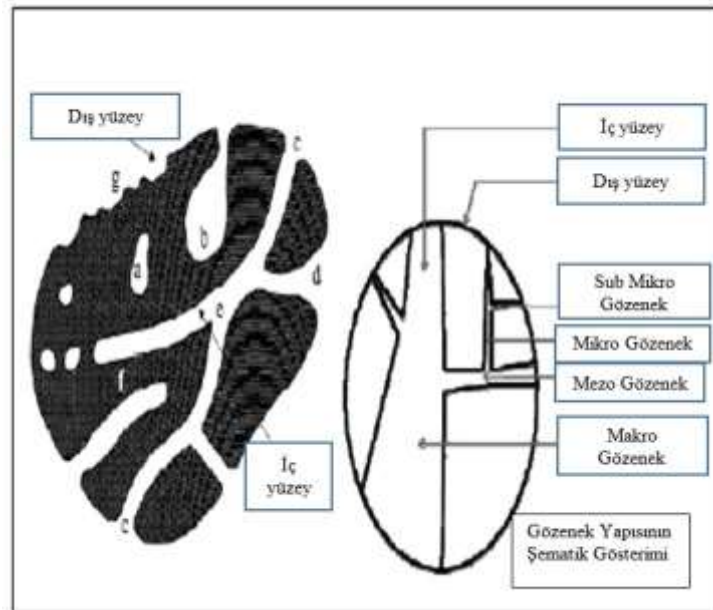
### 2.3.2. Gözenek hacmi

Aktif karbonda incelenen diğer önemli bir parametre de gözenek yapısıdır. Porozite olarak adlandırılan bu özellik belirli işlem basamaklarından meydana gelmektedir. Bu işlem basamakları sıralanacak olursa;

- Madde içinde bulunan H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> gibi moleküller karbonizasyon sıcaklığının artması ile beraber ortamdaki uzaklaşarak mikro gözenekler oluşur.

Bu gaz fazında uzaklaşan maddeler basıncın yükselmesi ile birlikte mikro kanalları oluşturur.

- Altıgen şeklindeki karbon atomları sıcaklık yükselmesi ile beraber ortaya çıkar. Bu yapı içerisindeki karbon dışı atomların uzaklaştırılması sonucunda selülozik bir yapı olan grafitik halini almış olur.
- Bu parçalanmış olan selülozik yapının karbon yapısı olarak yeniden düzenlenmesinde reaksiyon farklılıkları oluşacağından dolayı aktif karbon yapısında net bir modelleme yapılamamaktadır (Demiral ve Gündüzoğlu, 2010). Ancak bu işlemler mükemmel olmaktan uzaktır ve birçok hatayı içerebilir. Aktif karbonun farklı çaplarda olan gözenek yapısı şekil 2.3’de gösterilmiştir.

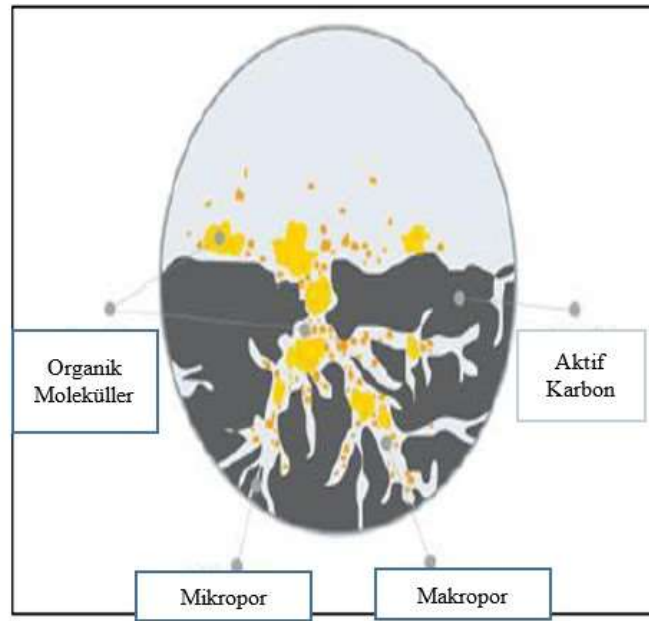


Şekil 2.3. Aktif karbonun gösterimi (İlçi, 2017)

Aktif karbonun gözenek genişliklerine göre değişik isimler almaktadır. Gözenek boyutları Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği tarafından yarıçaplarına göre üç ana kısımda analiz edilmektedir (Thommes, 2016).

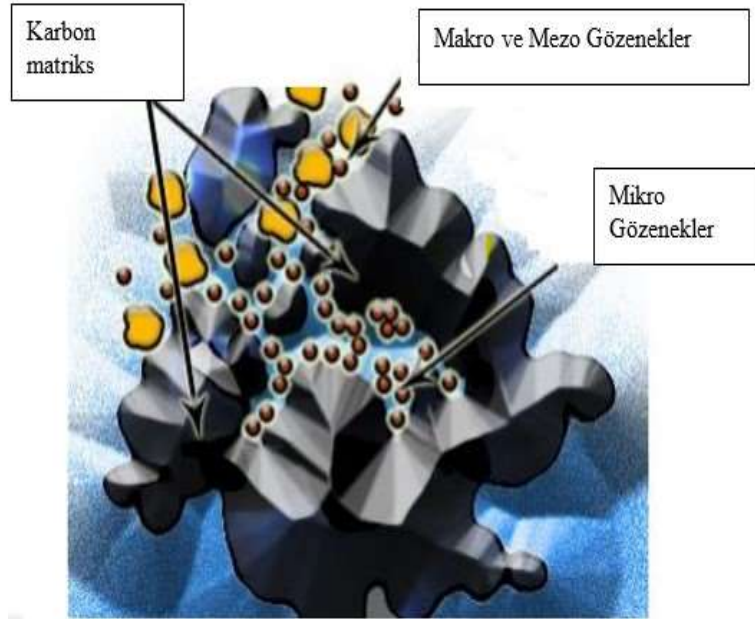
- Makro gözenekler ( $r > 50$  nm)
- Mezo gözenekler ( $2 < r < 50$  nm)
- Mikro gözenekler ( $r < 2$  nm)

Şekil 2.4'de aktif karbonun içinde bulunan mikro ve makro gözenek yapılarını göstermektedir.



Şekil 2.4. Aktif karbonun mikro gözenek ve makro gözenek yapısı (Güneş, 2016)

Uzaklaştırılmak istediğimiz kirliliklerin tanecik çapına uygun olacak şekilde gözenek büyüklüğüne sahip olması gerekir. Gözeneklere yakın moleküllerde karbon ve adsorpsiyon madde molekülleri arasında olan çekim kuvveti ve büyüklüğü daha yüksektir. Aktif karbonun içindeki makro gözeneklerin yardımıyla molekül aktif karbon içine yerleşirken, mezo gözenekler ise molekülü aktif karbonun iç kısımlarına doğru taşır. Adsorpsiyon işlemi için ise mikro gözenekler kullanılmaktadır (Güneş, 2016). Şekil 2.5'de aktif karbonun yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Aktif karbonun yapısı (purehealthywater, 2015)

### 2.3.3. Adsorpsiyon

Gaz, buhar, sıvı ve çözülmüş maddelerinin atomlarının, iyonlarının ya da moleküllerinin bir katı yüzeyinde toplanmasına adsorpsiyon, tutunmuş olan bu taneciklerin maddenin yüzeyinden ayrılması işlemine desorpsiyon, maddeyi yüzeyde soğurana adsorplayıcı (adsorbent) denilirken adsorban ise katının yüzeylerine tutunandır (Demir ve Yalçın, 2014). Adsorpsiyon, bir maddenin diğer bir madde yüzeyinde veya iki faz arasındaki moleküllerin, temas halinde oldukları yüzeydeki çekme kuvvetlerinin (zayıf ya da kuvvetli olabilir) etkisiyle bahsi geçen yüzeyle bir araya gelerek bir bütün oluşturması olarak tanımlayabiliriz (Beyhan, 2003).

Bu süreç, fazlardan birinde olan maddenin (çözelti içerisindeki molekül) diğer fazda bulunan maddenin (katı faz) yüzeyinde tutunduktan sonra ayrılması şeklindedir. Böylece adsorpsiyondan ayrılma işlemi gerçekleşir. Fiziksel, kimyasal ve biyolojik sistemler başta olmak üzere adsorpsiyon olayı özellikle bazı sistemlerde kullanılmaktadır. Özellikle endüstriyel uygulamalar başta olmak üzere su ve atık suların arıtılma işlemlerinin yapıldığı tesislerinde kullanılır. Adsorban molekülleri adsorbent yüzeyine zayıf ya da kuvvetli bir bağla bağlanabilirler. Böyle bir bağlanmada fiziksel ya da kimyasal adsorpsiyon oluşur (Beyhan, 2003).

Adsorpsiyon kapasitesi birçok faktörden etkilenir ve kapasiteyi arttırmak için aşağıdaki faktörler göz önünde bulundurulabilir:

*Yüzey alanı:* Aktif karbonun yüzey alanı arttıkça, adsorpsiyon kapasitesi de artar. Yüzey alanı, aktif karbonun mikroporozitesi ve mezoporozitesi ile doğrudan ilişkilidir (Donat vd., 2005).

*Porozite:* Aktif karbonun porozitesi, yüksek adsorpsiyon kapasitesi için önemlidir. Aktif karbonun içindeki gözeneklerin boyutu, şekli ve dağılımı, porozitenin özelliklerini belirler (Gündüzoğlu, 2008).

*Ph:* Adsorbatın pH'sı, adsorpsiyon kapasitesini etkileyebilir. Aktif karbonun Ph değeri, adsorpsiyon kapasitesini artırabilir veya azaltabilir (Özcan vd., 2006).

*Sıcaklık:* Sıcaklık, adsorpsiyon kapasitesini etkileyebilir. Genellikle, daha yüksek sıcaklıklar, adsorpsiyon kapasitesini artırır (Önal vd., 2006).

*Adsorban özellikleri:* Aktif karbonun yapısı ve özellikleri, adsorpsiyon kapasitesini etkileyebilir. Örneğin, farklı yüzey fonksiyonel gruplarına sahip aktif karbonlar, farklı adsorpsiyon kapasitelerine sahip olabilir (Helvacı ve Korkmaz, 2024; Yıldız, 2017).

*Adsorbat konsantrasyonu:* Adsorpsiyon kapasitesi, adsorbat konsantrasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Daha yüksek konsantrasyonlar, daha yüksek adsorpsiyon kapasitelerine yol açabilir (Okiel vd., 2011).

Yukarıdaki faktörler, aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesini artırmak için dikkate alınabilecek bazı yöntemlerdir. Ancak, adsorpsiyon kapasitesinin artırılması, uygulama için uygun olan adsorban ve işlem koşullarının belirlenmesiyle mümkündür.

## **2.4. Aktif Karbon Türleri**

Fiziksel ve kimyasal aktivasyon işleminden sonra hammaddelerden üretilen aktif karbonlar, Toz, Granüler, Pellet, Küresel, Emprenya, Polimer kaplanmış aktif karbonlar olarak hazırlanır.

### **2.4.1. Toz aktif karbonlar**

Öğütülmüş olarak 0,18 mm'den daha küçük tane boyuna sahiptir. Genellikle gaz ve sıvı fazlı ortamlarında adsorbent olarak kullanılır. Geniş yüzey alanlara sahip olması ve küçük difüzyon mesafeleri bu tip aktif karbonun özellikleri arasında vardır. Kullanım

amacı çözeltili fazı adsorpsiyonu için olup, oldukça kolay bir kullanıma sahiptir. İstenmeyen kötü koku, tat ve rengin giderilmesini için tıbbi alanlarda, atıksu arıtma tesislerinde ve içmesuyu arıtma tesislerinde kullanılır (Sevimli, 2017). Şekil 2.6'da toz aktif karbon gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Toz (PAC) aktif karbon (solechem, t.y.)

#### 2.4.2. Granül aktif karbonlar

Bu gruptaki aktif karbonların tanecik boyutu 0,2-5 mm arasında, düzensiz şekillere sahiptir (Sevimli, 2017). Granül aktif karbonu toz aktif karbon ile kıyaslayacak olursak daha büyük tanecik boyutuna sahip olmasına karşın daha küçük dış yüzey alanına sahiptir. Bir başka özelliği de difüzyon hızının oldukça yüksek olmasıdır. Kullanım alanları gaz ve sıvı adsorpsiyonunda kullanılır. Karbon granüllerinin boyutu çok önemlidir. Parçacık boyutu kullanılacak olan yatağın yüksekliğine bağlı olarak seçilmelidir. Çünkü parçacıkların boyunun küçük olması demek, yatak boyunca basınç düşür ve gaz, karbon parçacıklarını sürükler. Fazla yükseklik ise, granüllerin de boyutlarında artmaya neden olmaktadır. Kullanılacak olan suların saflaştırılması, renklerinin giderilmesi ve akış sistem bileşenlerinin ayırımı gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (solechem, t.y.). Şekil 2.7'de granül aktif karbon gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Granül (GAC) aktif karbon (solechem, t.y.)

#### 2.4.3. Pellet aktif karbonlar

Basınç uygulandıktan sonra tanecik boyutu 0,8-5 mm olacak şekilde pellet haline gelen silindirik bir şekil özelliği gösteren aktif karbonlardır. Genel olarak gazların saflaştırılmasında kullanılır. Yüksek mekanik dayanıklılığa sahiptir (Küçükgül, 2004). Şekil 2.8’de pellet aktif karbon gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Pellet aktif karbon (solechem, t.y.)

#### 2.4.4. Küresel aktif karbonlar

Naftalin ve tetralin içerisinde katran eritilerekte küresel aktif karbon üretilebilir (Oğuz, 2013) Gözenek yapısı oluşturmak için küreler nafta çözücüsü yardımıyla naftalin ekstrakte edilir. Katran kürelerin oksijenin %10’unu kimyasal olarak adsorplayabilmesi için %30 oksijen içeriğine sahip oksidasyon gazlarının içinde 373-673 K arasında olan bir sıcaklıkta ısıtılırlar. Bu okside kürelerin yüksek mekanik özelliklere sahip olabilmesi

için tekrar 423-973K sıcaklıklarda amonyakla ısıtılıp CO<sub>2</sub> veya buharla tekrardan aktive edilirler (Oğuz, 2013).

#### **2.4.5. Emperye aktif karbonlar**

Bu tür aktif karbonlar iyot, gümüş, alüminyum, magnezyum, çinko, demir, lityum, kalsiyum, ketonlar, tersiyer aminler gibi içeriklere sahip olan karbonlar kullanılarak hazırlanırlar. Örneğin; iyot emdirilerek üretilen bu aktif karbonlar, sağlığa zararlı gazların içinde bulunan SO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>S'in bertaraf edilmesinde katalizör olarak kullanılmaktadır (Kumaş, 2015)

#### **2.4.6. Polimer kaplanmış aktif karbonlar**

Etrafına ince tabaka şeklinde polimer kaplanarak pürüzsüz ve geçirgen bir "biocompatible" polimeri, gözenekli karbonlardan üretmiştir (Oğuz, 2013).

### **2.5. Aktif Karbon Üretiminde Kullanılabilen Hammaddeler**

Yeterli düzeyde karbon içeren, düşük maliyetli ve kolay erişilebilir katı hammaddeler, çevresel ve ekonomik avantajları nedeniyle aktif karbon üretiminde yaygın olarak tercih edilen öncü malzemeler arasında yer almaktadır. Yapılan literatür araştırmalarında kömür, odun, meyve çekirdeği ve kabukları, hindistan cevizi, fındık kabukları ve narince kabukları gibi doğal atık malzemeler kullanılır. Ayrıca aktif karbon polimer bazlı çeşitli organik olmayan endüstriyel atıklardan da üretilmektedir (Bouchelta vd., 2008; Demiral ve Gündüzoğlu, 2010; Toles vd., 1996).

Başlangıçta kullanmış olduğumuz ham maddelere göre, aktif karbonun fiziksel, kimyasal yapısı ve adsorpsiyon özellikleri farklılıklar gösterebilir. Aktif karbon üretiminde özellikle kömür kullanılması halinde, taşkömürü, linyit ve turbada başlangıç maddesinin kalitesi, içerisinde barındırdığı mineral madde ve kükürt içeriği ve maliyetleri, hammadde seçiminde belirleyici rol almaktadır (Rosas vd., 2008). Tablo 2.1'de aktif karbon üretimi için kullanılan bazı hammaddeler gösterilmiştir.

**Tablo 2.1.** Aktif karbon için kullanılabilen hammaddeler (Patrick, 1995)

Susuz şeker kamışı	Damıtık atıklar	Yağ taşı
Şeker pancarı çamuru	Balık	Pirinç kabuğu
Kan	İs	Odun
Kemik	Meyve çekirdeği	Turba
Karbonhidratlar	Grafit	Petrol asit çamuru
Hububatlar	Esmer su yosunu	Petrol koku
Kömür	Su yosunu	Kauçuk atıkları
Hindistan cevizi kabuğu	Deri atıkları	Testere talaşı
Kahve tanesi	Linyit	Lignin
Mısır koçanı	Selüloz	Mısır sapı
Pamuk çekirdeği kabuğu	Fındık kabuğu	Melas

Bu karbon kaynaklarının birbiri ile karşılaştırıldığımızda kenevir bitkisinin büyüme aşamasında suyu ve besinleri taşınmasını sağlayan farklı doğal gözenek yapısı, gazların adsorpsiyon işlemlerinde diğerlerine göre daha düşük gaz difüzyon direncine sahip olan aktif karbon üretilmesine yardımcı olur (Ahmedpour ve Do, 1996; Hong vd., 2016; Qin vd., 2014).

## 2.6. Aktif Karbon Üretim Yöntemleri

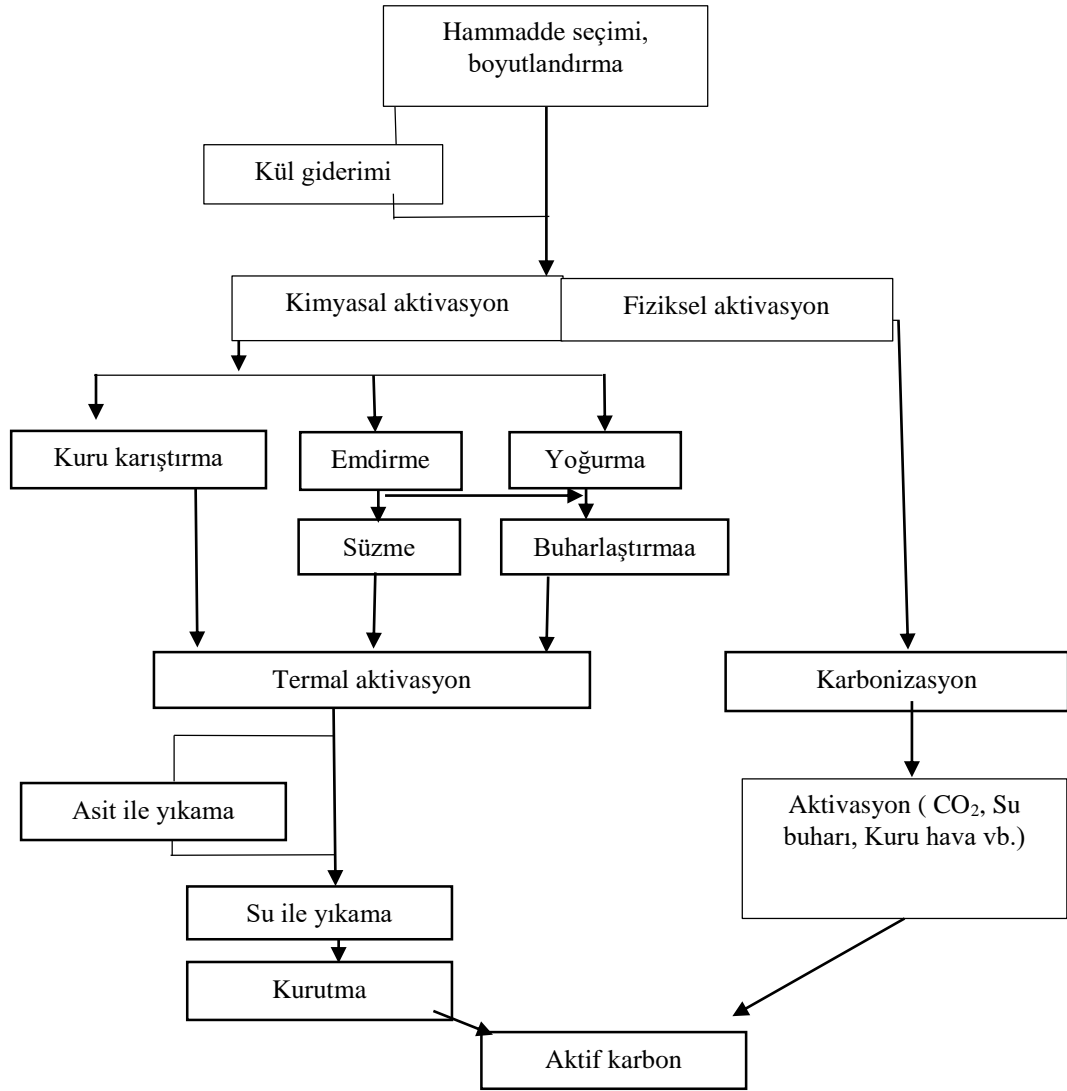
Aktif karbon üretimini fiziksel ve kimyasal aktivasyon olmak üzere iki yöntemle kullanarak gerçekleştiririz. Aktif karbonun üretim aşaması genellikle üç aşamadan oluşmaktadır.

*Dehidrasyon:* Suyun kullanmış olduğumuz ham madde bünyesinden uzaklaştırılması,

*Demineralizasyon:* Karbonlu malzeme içerisinde bulunan kül içeriğinin giderilmesi,

*Karbonizasyon:* Organik maddelerin elemental karbona dönüşmesi ve karbon dışında olan partiküllerin hammaddeden uzaklaştırılması,

*Aktivasyon (Fiziksel ve Kimyasal):* Yanma işlemi ile (katranın yanarak) gözeneklerin büyüleştirilmesidir (Aygün, 2002; Walther, 1983). Şekil 2.9'da aktif karbonun üretim şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Aktif karbonun üretim şeması (Sevimli, 2017)

### 2.6.1. Kül giderimi

Gözeneklerin oluşturulması ve yapı içerisinde inorganik maddelerin giderilmesi için karbonlu malzeme özellikle kömürde karbonizasyon öncesinde asit ile muamele edilir. Kül gideriminde en çok HCl, HF, HNO<sub>3</sub> gibi asitler kullanılır (Hacifazlıoğlu ve Uçkan, 2014). Karbonlu malzemeye asit ile muamele edildiğinde kül miktarını düşürür ancak bazı olumsuz sonuçları ortaya çıkmaktadır. Karbonlu yapıların içerisinde bulunan alifatik karbonlarının, alkali aromatik karbonların ve hidroksil grupların azalması ya da yok olması, karboksil grupların oranının artması gibi sayabiliriz (Jasienko, 1981; Lu vd., 2013). Aktif karbondaki kül giderimi fiziksel aktivasyon işleminden önce yapılması gerekmekte ve oldukça önemlidir (Gomez-Serrano vd., 2005; Olivares-Marín vd., 2006).

Fakat kimyasal aktivasyon üretim yöntemi ile üretim yapılacaksa aktif karbonun asit ile yıkama işleminin yapılmasına gerek yoktur.

### 2.6.2. Karbonizasyon

Karbonizasyon, hammaddenin içerisinde bulunan nemin ve uçucu maddelerin inert ortamdan uzaklaştırılması sonucunda temel gözenek yapının oluştuğu bir işlemdir (Aşma vd., 2023). Buradaki ana hedef, aktivasyon ajanları ile ana maddenin birbiriyle etkileşiminden dolayı meydana gelen karbon iskeleti haricindeki muhtevasında karbon olmayan yapının inert bir sistemde uygulanacak olan bir sıcaklık ile yapıdan uzaklaştırılmasıdır (Malini vd., 2023). Karbonizasyon sıcaklığındaki değişimler gözenek hacimlerini büyük ölçüde etkilemektedir (Hmid vd., 2014; Khiari vd., 2020). Daha yüksek kaliteli ve verimli mamül elde edebilmek için bazı önemli parametreler vardır. Hammaddenin doğal ve fiziksel hallerinin yanı sıra ısıtma hızı, sıcaklık, sıcaklıkta kalma süresi kaliteli ve verimli mamul elde etmek için önemlidir (Yaashikaa vd., 2020). Isıtma hızını düşük tutarsak karbonizasyon işleminde az uçucu madde giderimi ve yüksek oranda kömürleşme (Char) verimi elde edilebiliriz (Daful ve R Chandraratne, 2020). Çünkü bu işlemde dehidrasyon oranı yükselir ve polimetrik bileşenler daha kararlı hale gelmektedir. Karbonizasyon için 2 önemli aşama vardır. Bunlardan ilk aşama yumuşama sürecidir. Sıcaklık kontrolü bu aşamada elde edilecek olan char'ın özelliklerini büyük ölçüde etkiler (Aşma vd., 2023). Bu aşamanın akabinde char sertleşerek gözeneklilik oranının artmasında aktif rol alır (Elbinsoy, 2016). Eğer kullanmış olduğumuz kömür yumuşak kömür ise yumuşama aşaması boyunca sıcaklık az az yükseltilmelidir (Alçın, 2022). Bunun sebebi ise gaz çıkışı sırasında granüllerde bulunan gözeneklerin bozularak verimsiz hale gelmesine neden olur. Örneğin ısıtma hızını düşük tutarak Petrol koku, Hindistan cevizi, Lignin ve odun gibi hammaddelerden yoğun ve sert char elde edilmektedir. Yoğunlukları düşük maddeler kullanıldığımızda Hindistan cevizi gibi maddelerden elde ettiğimiz karbona benzeyen mikro gözenek hacimlerine sahip karbon elde edilebilir (Mukome vd., 2013). Karbonizasyon aşaması boyunca, bazı özellikler dikkate alınır;

- Heteroatomların ve uçucu bileşenlerin giderimi sonrası yapının karbon bakımından zenginleşmesi
- Hammadde içinde bulunan uçucu maddelerin uzaklaştırılması ile beraber yapı içerisinde gözeneklerin oluşumu

- Yüksek oranda karbon içeren maddede çapraz bağların oluşmasından sonra maddenin dayanımının yükselmesi
- Yükselen sıcaklık ile beraber iki boyutlu grafit yapısının gözenek gelişimine son vermesi (Sevimli, 2017).

### 2.6.3. Piroliz

Organik maddelerin oksijen bulunmayan bir ortamda ısıtılması ve termal olarak parçalanma işlemlerinin gerçekleşmesi olayına piroliz olarak adlandırılır (Rodriguez vd., 2020). 800°C'lik bir ortamda N<sub>2</sub> veya He gibi inert gazların mevcut ortamdan geçirilerek genellikle organik maddelerden aktif karbon elde edilmesine piroliz işlemi gerçekleşir (Menéndez-Díaz ve Martín-Gullón, 2006). Isıtma hızı, sıcaklık, sıcaklıkta kalma süresi, hammaddenin yapısı ve tane boyutu gibi değişkenler elde edilecek olan mamulün miktar ve kalitesine etki etmektedir.

### 2.6.4. Aktivasyon

Aktivasyon işlemi ile karbonizasyon süresince oluşan gözeneklerin hacimlerinin ve çaplarının artırılması, bunun yanı sıra yapıda yeni gözeneklerin oluşumu sağlanmış olunur (Küçükgül, 2004). Karbonizasyonun şartları ve hammaddenin yapısı gibi değişkenler yapının gözenek durumunu ve boyut dağılımında belirleyici bir etkisi vardır (Angin, 2014). Farklı kimyasal maddelerin kullanılarak mevcutta düzgün yapıda bulunan karbon tabakalar, bozularak gözenek yapısının oluşumu aktivasyon işlemi ile sağlanmaktadır. Gözeneklerin gelişmesi, büyümesi ve diğer komşu gözenekler arasında bulunan mevcut duvarların yıkılarak daha büyük gözeneklerin oluşması reaksiyon devam ettikçe oluşmaktadır (Hsu ve Teng, 2000; Hu vd., 2001). Mikro, mezo ve makro gözenek yapısında meydana gelen değişmelere ham madde, aktivasyonda kullanılan kimyasal madde, aktivasyon süresi gibi değişkenler etki etmektedir (Malini vd., 2023).

Aktivasyon işlemi çok değişmemekle beraber 15 dakika ile birkaç saat arasında tamamlanmaktadır. Aktivasyon işlemi fiziksel ve kimyasal aktivasyon olmak üzere iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmektedir.

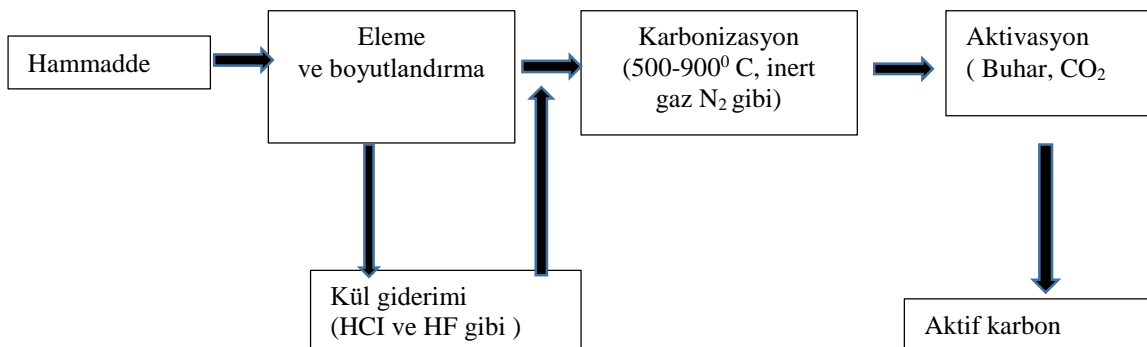
### 2.6.4.1. Fiziksel aktivasyon

Fiziksel aktivasyon genel hatlarıyla iki basamaktan meydana geldiği söylenebilir. İki basamak olarak gerçekleşen fiziksel aktivasyon karbonlu ürünün karbonizasyonu ve bu sürecin bir sonraki aşaması ise yeterli miktarda oksidasyon gazı ile beraber ( $\text{CO}_2$ , buhar, hava veya bunların karışımı ile), sıcaklığın istenilen seviyeye yükseltilmesi ile aktivasyonun tamamlanmasıdır (Bedia vd., 2020).

Fiziksel aktivasyonda  $\text{CO}_2$  gazının tercih edilmesinin sebebi temiz ve kolay elde edilebilmesi,  $800^\circ\text{C}$ 'de gibi bir sıcaklıkta reaksiyon hızının düşük olması ve kolay kontrol edilebilmesidir. Bu yöntemin kullanımında genel olarak pirinç kabuğu, mısır koçanı, meşe ağacı, fındık, yer fıstığı, badem kabukları vb atıklar ana madde olarak kullanılırlar (Sevimli, 2017).

Karbonizasyon sıcaklığı  $400-850^\circ\text{C}$  dir. Aktivasyon sıcaklığı ise  $600-900^\circ\text{C}$  arasında bir değerde olur. Adsorbent olarak veya filtrelerde bu yöntem ile oluşturulan aktif karbonlar çok kullanılmazlar (Bolgaz, 2008; Güneş, 2016). Aktivasyonun sıcaklığına ve aktivasyon da kullanılan gazların yapısına bağlı olarak aktivasyon derecesi değişmektedir. Aktive edici madde olarak genellikle buhar kullanılmakla beraber, yanma sonucu oluşan ürünler  $\text{CO}_2$  gazı veya klor, kükürt buharları,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  ve bazı diğer gazlarda nadiren de olsa aktivasyonun gerçekleştirilmesi amacı ile kullanılmaktadır (Utku, 2021).

Fiziksel aktivasyon için son zamanlarda akışkan yatak sistemleri de kullanılmakta olsa da genel olarak direkt ısıtmalı döner fırınlar tercih edildiği görülmektedir (Bolgaz, 2008). Fiziksel aktive edici gaz olarak endüstriyel uygulamalarda ise genellikle buhar ve  $\text{CO}_2$  en çok kullanımı olan gazlardır. Fiziksel aktivasyon şemasının örneği aşağıda gösterildiği gibidir. Şekil 2.10'da fiziksel aktivasyon şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Aktif karbonun üretim şeması (Sevimli, 2017)

### 2.6.4.2. Kimyasal aktivasyon

İstenilen yüzey alanı ile gözenek hacmine sahip olan aktif karbonların üretmenin farklı bir yöntemi de kimyasal aktivasyon yöntemidir (Özdemir, 2013). Elde olan ham madde ile önceden temin edilmiş olan kimyasal bir maddenin 500–900°C gibi bir sıcaklık sıkalasında reaksiyona girmesiyle oluşan reaksiyona kimyasal aktivasyon denir (Özyılmaz, 2023). Bu aktivasyon işlemi tek bir adım da meydana gelmektedir. Kimyasal aktivasyonun fiziksel aktivasyona göre avantajını sıralayacak olursak aşağıdaki gibi sıralayabiliriz (Güneş, 2016; İlçi, 2017).

- Tek basamakta gerçekleşen bir aktivasyondur,
- Daha düşük sıcaklıklarda aktivasyon gerçekleşir,
- Daha kısa sürede aktivasyon gerçekleşir,
- İşlem sonucunda oluşan katı ürünlerin verimi yüksektir,
- Yapı içerisinde olan mikro gözeneklerin hacimleri oldukça gelişmiştir,
- Geri kazanımı olan kimyasallar kullanılması,
- Yüzey alanının geniş olması gibi sıralayabiliriz.

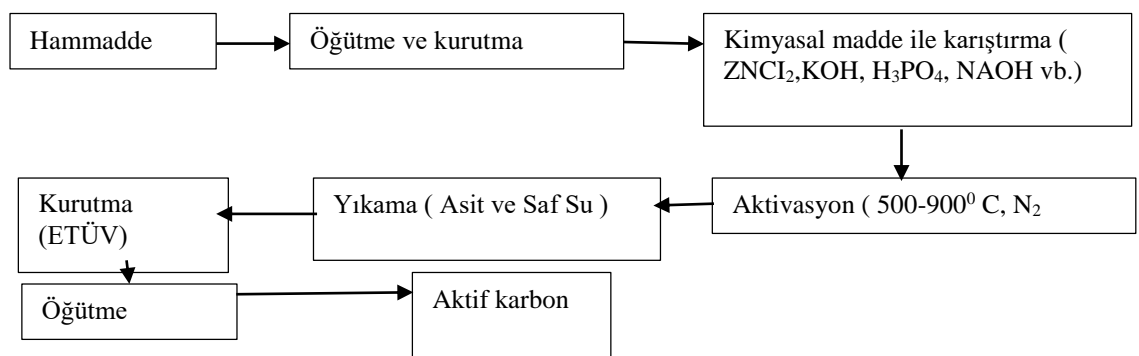
Bu aktivasyon yönteminde kullanılan kimyasalları sıralayacak olursak aşağıdaki tablo gibidir (Özdemir, 2013; Utku, 2021; Wigmans, 1989). Tablo 2.2 'de kimyasal aktivasyonda kullanılan kimyasal maddeler gösterilmiştir.

**Tablo 2.2.** Kimyasal aktivasyonda kullanılan kimyasal maddeler

Kalsiyum hidroksit	Sodyum klorür
Mangan klorür	Sodyum sülfat
Kalsiyum klorür	Sodyum sülfür
Kalsiyum fosfat	Çinko klorür
Potasyum hidroksit	Fosforik asit
Potasyum permanganat	Sülfirik asit
Potasyum karbonat	Kükürt
Potasyum tiosiyaniür	Kükürt dioksit
Mangan dioksit	Nitrik asit
Mangan sülfat	Siyanitler
Dolamitler	Klor

Genel olarak ham maddenin dehidrasyonuna sebep olan  $ZnCl_2$ ,  $KOH$ ,  $H_3PO_4$ ,  $NaOH$  ve  $K_2CO_3$  gibi kimyasallar bu aktivasyon yönteminde en fazla kullanılan kimyasal bileşiklerdir (Ahmedpour ve Do, 1996; Gurten vd., 2012; Kopac ve Erdogan, 2009; Kopac ve Kırca, 2020; Rouquerol J. ve Sing, 1999; Ruofei vd., 2017; Xia vd., 2016). Potasyum tuzları  $ZnCl_2$  veya  $H_3PO_4$  ile karşılaştırıldığında çevreye daha az zarar veren temiz bir üretim teknolojisidir (Tsai vd., 2001). Bu aktivasyon işleminden önce elimizde olan ham maddelerin aktivasyon işlemini yapacak olan kimyasalı ile iyi bir şekilde karıştırılması gerekmektedir (Özyılmaz, 2023). Tek kademeli bir işlem olan kimyasal aktivasyon, inert ortamda değişken sıcaklık derecelerinde ısıl işlemden önce ‘emdirme’ aşamasının uygulandığı prosesdir. Ham maddenin aktif karbona dönüşümünü olumlu yönde etkilemek ve aktifleştirici ajan uçucu maddelerin salınımını azaltmak için emdirme işlemi sırasında belli oranlarda (0.5:1, 1:2, 1.5:2) ham madde ilave edilir (Özpınar, 2021). Yıkama işlemi ham maddeyi aktifleştirmede harcanan kimyasalların uzaklaştırılması amacı ile yapılmaktadır (İlçi, 2017).

Bu işlemden sonra aktivasyonu sağlayan kimyasallar uzaklaştırılmış olur ve gözeneklerin yapılarında bulunan is giderilir. Karbonun içinde bulunan tüm alkali ve toprak alkali metallerin uzaklaşması asit ile yıkama işleminde sağlanırken, bu işlemden sonra kalan asidin ve suda çözünen bileşenlerin giderilmesi ise su ile yıkama da sağlanmaktadır (Vural, 2007). Şekil 2.11’de kimyasal aktivasyon yöntemi ile aktif karbon üretimi akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 2. 11. Kimyasal aktivasyon ile aktif karbon üretim akış şeması (Bolgaz, 2008; Güneş, 2016)

## 2.7. Aktif Karbonun Uygulama Alanları

İç gözenek yapısının ve yüzey alanı gibi özelliklerinin iyi olması ve bu özellikleri sayesinde iyi bir adsorpsiyon kapasitesine sahip Aktif karbonlar, atık su arıtma

tesislerinde istenmeyen koku, renk, tat, diğ er organik ve inorganik kirliliklerin ortamd an uzaklaştırılmasında kullanılırlar (Roy, 2023). Kullanılan ç özücü gruplarının geri kazanılması vb sıvı faz uygulamalarında kullanılırlar (Campos vd., 2020). Yaş adığımız alanlar, restoranlar, bazı endüstrileri binalarında kirli havanın temizlenmesi ve temiz hava elde edilmesinde kullanılırlar. Ayrıca medikal tablet ve ş uruplar gibi ilaç sektöründe renk giderilmesinde; hava kirliliğine sebebiyet veren çeş itli endüstriyel baca gazlarında, günlük hayatta kullanmış olduğumuz araçların egzoz çıkışındaki gazlarının hava kirliliği kontrolünde; birçok kimyasal, medikal ilaçların saflaştırılmasında, Gaz faz uygulamalarında kullanılan iyi bir adsorbenttir (Cuerda-Correa vd., 2010; Suriyanon vd., 2015). Vücutta bulunan toksinlerin vücuttan atılmasında ve bakteri kaynaklı enfeksiyon tedavilerinde kullanılan ilaçların içerisinde Aktif karbon uygulamaları görülmektedir (Gündoğdu, 2010). Aktif karbon, günlük hayatımızın birçok yerinde kullanmış olduğumuz ve vazgeçilmez olan gıda, ilaç, kimya, petrol, nükleer enerji ve otomotiv gibi endüstrisi sektörlerinde kullanılmaktadır (Beton, 2011).

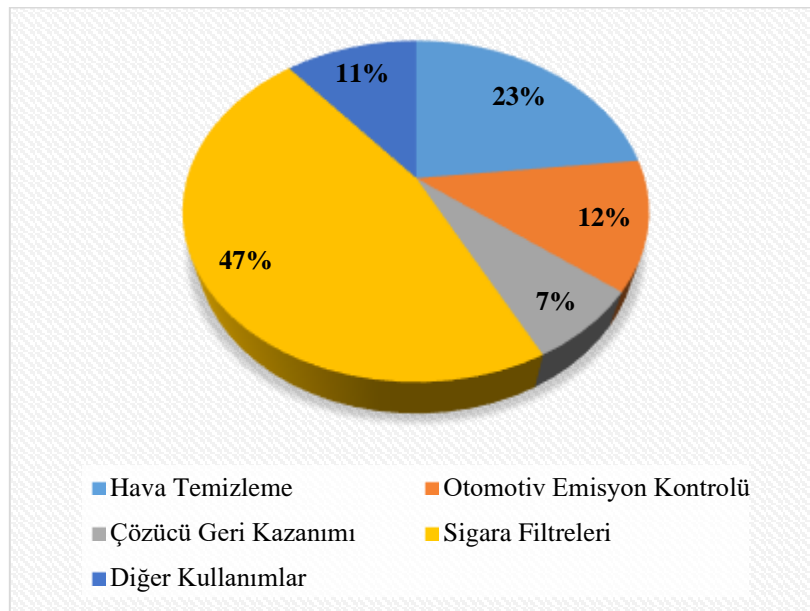
Genel hatlarıyla, asidik yüzeye sahip olan Aktif karbonlar için bazik gaz adsorpsiyonlarında, bazik yüzeye sahip olan Aktif karbonlar ise asidik gaz adsorpsiyonlarında kullanılmaktadır (Zabaniotou, 2006). Aktif karbonlar genel olarak sıvı ve gaz faz uygulamaları olarak iki ayrı uygulaması vardır.

### **2.7.1. Gaz fazı uygulamaları**

Bazı ç özücü buharları hava ile karış tığında yanıcı özellik göstermesinden ötürü, bunların buhar konsantrasyonu belirli bir değ erin altında tutulması gerekmektedir (Kürkçü t.y.). Bu yanıcılık özelliği kimyasalların cinsine göre değ işmekte ve değ iş en hava/kimyasal buhar oranına göre belirli bir oranın üstüne çıkmaması gerekiyor (Öner, 2009). Hali hazırda çalışmaya devam eden bu sistemlerin güvenliği ve ekonomisi için de bu bir gerekliliktir. Aktif karbon ile ç özücülerin geri kazanıldığı bu sistemler hızlı ve etkin bir şekilde işlemektedir. Maliyeti düşük olan bu sistemde ç özücünün kazanımı büyük oranda geri sağlanmış olur. Merkezi sinir sistemlerine, böbrek ve pankreasa gibi iç organlara son derece zararlı etkileri olan aseton oksijenli uçucu organik kirleticilerden biri olup aseton plastik, kauçuk ve ilaç endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Erdoğan ve Kopaç, 2020). Bundan dolayı bunun gibi zehirli ç özücülerin yayılımının

kontrol altına alınmasına gerekmektedir. Bu zararlı olan uçucu olan organik bileşiklerin mevcut ortam havasındaki derişimlerini azaltmak için bazı yöntemler olmakla beraber, bu yöntemleri sayacak olursak biyolojik bozunma, fotokataliz, katalitik oksidasyon, adsorpsiyon gibi yöntemler sayabiliriz (Kirscher, 2003; Kirscher, 2006. Ethylene, 270(4), 34. t.y.). Bu yöntemler içinde en etkili yöntem olarak adsorpsiyon olarak bilinmektedir (Kim vd., 2018; Wang vd., 2019).

Mikro organizmalar için zehirli olan bazı maddeleri adsorplayarak fermantasyonu hızlandırmasından dolayı fermantasyon işlemlerinde de sık sık aktif karbon kullanılmaktadır. Ancak bunu yanı sıra yararlı enzimleri ve mikroorganizma besinlerini de adsorplama yaptığından dolayı işleyen sistemin yavaşlamasına sebebiyet vermektedir (Hassler, 1967). Şekil 2.12’de aktif karbonun gaz fazı uygulamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Aktif karbonun gaz fazı uygulama alanları (Kirscher, 2003; Kirscher, 2006; Ethylene, 270(4), 34. t.y.)

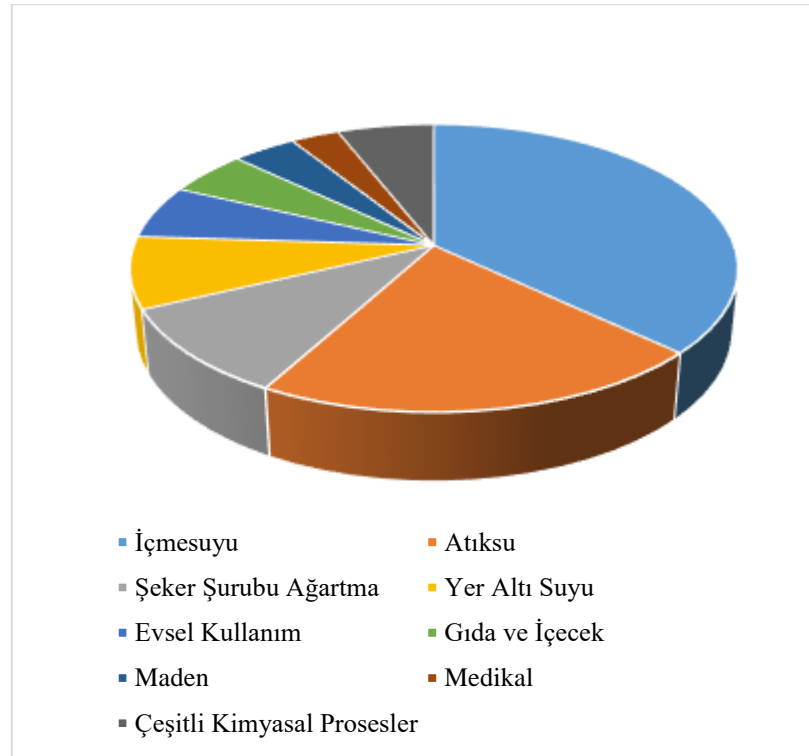
### 2.7.2. Sıvı faz uygulamaları

Endüstriyel kaynaklı atıkların büyük bir oranı günümüz şartlarındaki arıtma yöntemleri ile giderilemesi zor olan küçük konsantrasyonlar da organik madde içeriğine sahiptirler. Suda eriyen, görünmesi zor bu atıkların giderilebilmesinde etkili ve uygulanabilir yöntemlerden biride bu maddelerin aktif karbon ile adsorpsiyonlanmasıdır (Akgül vd., 2019). Elektrostatik ve yüzeyde bulunan aktif güçlerin sayesinde su ve atık su içinde erimiş halde bulunan ve biyolojik çürüme olasılıkları düşük olan kokulu, doğal

veya yapay organik hidrokarbonlu maddeler adsorban ara yüzeyinde birikmektedir (Sevimli, 2017). Adsorban özelliği iyi olan ve adsorban madde olarak kullanılan en yaygın madde Aktif karbondur. En yüksek arıtma performansına sahip olan aktif karbon çeşitli dinamik sistemlerde toz veya granül halinde bulunur.

Adsorpsiyon işlemi, içmesuyudan ya da atık sularda su arıtımında; çözünmüş halde, tat ve kokuda değişiklik yapan klorlu hidrokarbon bileşiklerin gideriminde, bütün ağır metaller olmamakla beraber ağır metal gideriminde, atık suların içinde bulunan çürümeyen biyolojik atıkların gideriminde, yüzey aktif maddeleri, tarım ilaçları, bazı zehirli metal iyonları gibi atıkların gideriminde ve kullanılabilir bir su elde etmek için kullanılmaktadır (Gür, 1994). İçmesularında bulunan fenoller, hoş olmayan tat ve kokuya sebep olmasının yanında biyolojik prosesler de negatif etkiye de sebebiyet vermektedir (Güler, 2008; Mostafa vd., 1989). Ayrıca içme kullanma suyu için dezenfeksiyon işlemlerinde kullanmış olduğumuz klor gazları yüzeysel suların içinde olan organik maddeler ile reaksiyona girmesiyle kanserojen etkiye sebebiyet vermektedir (Özdoğan ve Özdemir, 2019). Aktif karbonlar burada da yüzey suların içinde bulunan mevcut organik maddelerin Adsorpsiyon edilmesinde kullanılır (Sevimli, 2017).

Aktif karbon aynı zaman da şeker şuruplarında renk verici maddelerin yapıdan uzaklaştırılmasında, muamele kolloidal maddeleri ve yüzey aktif maddeleri uzaklaştırmasında, yüzey gerilimini artırılmasında ve vizkoziteyi azaltmada etkin rol alır (Balçık vd., 2020; Zahoor, 2011). Böylece şekerin kristalizasyon süreci hızlanmaktadır. Sıvı faz ve gaz faz uygulamalarında kullanılan aktif karbonlar farklılık göstermektedir. Aktif karbon sıvı fazlarda kullanılanıldıklarında makro difüzyon olur. Şekil 2.13'de aktif karbonun sıvı faz uygulama alanları gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Sıvı faz uygulama alanları (Kirscher, 2003; Kirscher, 2006; Ethylene, 270(4), 34. t.y.)

## 2.8. Adsorpsiyon ve Türleri

Bir katı gaz ya da sıvının sınır yüzeylerinde meydana gelen derişim değişikliğine adsorpsiyon işlemi denir (Dumanlı, 2011). Bu işlem aynı fazlar arasında olacağı gibi farklı fazlar arasında da olabilir. Adsorpsiyon sisteminde tutan yüzeye adsorban, bu yüzeye tutunacak olan maddeye adsorplanan diye adlandırılır. Adsorbanın kimyasal özellikleri ve adsorbana adsorpsiyon işleminde önce uygulanmış olan ön işlemler gibi işlemlerde etkiler. Adsorpsiyon işleminin tam tersinde, yani adsorplanan maddenin yüzeyden uzaklaşmasında desorpsiyon işlemi oluşur (Dumanlı, 2011). Adsorpsiyon fiziksel ve kimyasal ve iyonik adsorpsiyon olmak üzere üç ana grupta meydana gelir.

### 2.8.1. Fiziksel adsorpsiyon

Katı bir yüzeyde adsorplanan madde molekülleri ile arasındaki çekim kuvvetlerinden kaynaklı olarak oluşan bir adsorpsiyon mekanizmasıdır. Bu mekanizmada adsorblanan madde adsorban yüzeyine bağlı olmadan hareketli bir vaziyettedir. Bu adsorpsiyon mekanizmasında daha çok Van der Waals kuvvetleri etkili olup işlem tersinir bir işlemdir (Batmaz, 2022). Aktivasyon enerjisinin olmadığı ve kimyasal adsorpsiyona

göre kimyasal enerjinin oldukça düşük olduğu bir adsorpsiyondur. Moleküller arasında olan çekim kuvvetleri ve Van der Waals kuvvetlerinin etkisiyle gerçekleşen fiziksel adsorpsiyon işleminde adsorpsiyon sıcaklık artışı ile azalır (Demir ve Yalçın, 2014).

Adsorbanın geri kazanılıp tekrar kullanılabilirliği olan fiziksel adsorpsiyonda, adsorpsiyon işlemi birden fazla katmanda gerçekleşebilir. Bu yöneme en güzel örnek verecek olursak aktif karbon diyebiliriz. Ancak bunu sadece fiziksel adsorpsiyon ile açıklamak yeterli değildir. Çünkü fiziksel adsorpsiyonun yanı sıra farklı şekilde mekanizmalar ile birlikte adsorpsiyon işlemi devam edebilir (Sarıkaya, 2005).

### **2.8.2. Kimyasal adsorpsiyon**

Fiziksel adsorpsiyona göre daha güçlü kuvvetlerin etkisini sonucunda meydana gelen mekanizmadır. Bu adsorpsiyon türü kimyasal etkileşimler ile oluşur. Adsorban moleküllerinin yüzey üzerinde hareket etmediği bu mekanizmada adsorpsiyon anında ortaya çıkan ısı tepkime ısısından daha büyüktür (Demir ve Yalçın, 2014). Bu şekilde meydana gelen adsorpsiyon tersinmez ve aktivasyon enerjisi yüksektir. Bu süreç içinde meydana gelen enerji yüksek olduğundan adsorpsiyon yüksek sıcaklıklarda çok çabuk meydana gelir. Bu işlem adsorbanın yüzeyinin tamamen adsorplanan tarafından kaplandığında süreç tamamlanır. Bu adsorpsiyon işleminden sonra adsorbanı tekrar kullanabilmek için yıkama, yüksek sıcaklarda ısıtma işlemleri gibi ek işlemler yapmak gerekir (Sarıkaya, 2005).

### **2.8.3. İyonik adsorpsiyon**

Çözelti içerisinde bulunan iyonik karakterdeki adsorplananların elektrostatik yükler yardımıyla yüzeyde bulunan yüklü bölgelere çekilmesi sonucunda meydana gelir (Demirel, 2001). İyonik güçlere ve molekül büyüklüklerine göre seçimli olarak oluşurken iyon yüklerinin eş durumda olması durumunda küçük iyon tercih sebebidir. Çoğu durumda fiziksel, kimyasal ve iyonik adsorpsiyon bazen ard arda olurken bazen de birlikte olabilir (Hassler, 1974; Ross ve Oliver, 1964).

## 2.9. Adsorpsiyon İzotermi

Sabit bir sıcaklıkta adsorbent tarafından adsorplanan madde miktarının sistemin dengelendiği basınç veya sistemdeki konsantrasyonu arasında bulunan bağıntıya adsorpsiyon izotermi adı verilmektedir (Şamdan, 2013). Adsorpsiyon işlemi sistem dengeye gelene kadar devam eder. Adsorpsiyon işlemi sırasında adsorplanan maddenin derişimi ve ortamın sıcaklığına göre adsorplanan madde miktarı değişmektedir. Sistem dengeye geldikten sonra çözeltinin konsantrasyonu ve adsorplanan maddenin miktarında bir değişme olmaz. Denge durumuna gelmiş olan bu sistemde adsorplanmadan kalmış olan çözünenin derişimine karşın birim adsorbanın kütlesinde çözünenin adsorplanmış olan miktarı grafiğe veri olarak girilir. Buradan çıkan sonuçlarda adsorpsiyon izotermi sonuç fonksiyonlarını elde etmiş oluruz (Avcı, 2008). Burada izotermi adsorplanan maddenin konsantrasyonu ile birlikte değişim göstermektedir. Adsorpsiyon sistemlerinin tasarlamasında denge izotermi büyük öneme sahiptir. Bu izoterm modellerinde şartların değişmesi durumunda modele uymamasından dolayı tek bir model kullanmak mümkün değildir. Yaygın olarak aşağıda belirtilen model izotermi kullanılmaktadır.

### 2.9.1. Freundlich izotermi

H.Freundlich'in bu izotermi hem çözelti adsorpsiyonunun da hem de gazların adsorpsiyonunun da kullanılmasına uygundur. Bu izoterm modeline göre adsorbanın yüzeylerinde olan adsorpsiyon yüzeylerinin homojen olmadığını ve her noktada adsorpsiyonun gerçekleşmediğini söyler. İzoterm aşağıdaki gibidir:

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.1)$$

$q_e$ : adsorban miktarı (mol/g)

$C_e$ : adsorban konsantrasyonu (mol/L)

$K_F$  ve  $n$ , Freundlich sabitleridir. Denklem logaritması alınarak Freundlich sabitlerinin değerleri bulunur. Elde edilen doğru denkleminin eğiminden  $n$ , kayması ise  $K_F$  değerine ulaşılır.

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2.2)$$

### 2.9.2. Langmuir izotermi

Bu izoterm modeline göre adsorpsiyon mekanizması adsorban üzerinde olan aktif bölgelerde gerçekleştiğini savunur. Bu modelin bir başka kabulü ise aktif bölgelerin sadece bir iyonun ya da molekülün adsorplanmasıdır. Bundan dolayı tek tabakalı bir adsorpsiyon mekanizması oluşur. Modelin denklemi aşağıdaki gibidir;

$$\frac{d\theta}{dt} = k_a(1 - \theta)C_e \quad (2.3)$$

$C_e$ : Çözeltinin konsantrasyonunu

$\theta$ : Adsorbanın kapladığı kesiri

$(1-\theta)$ : Adsorbanın kaplayamadığı kesiri

$k_a$ : adsorpsiyonun hız sabitidir.

$$\frac{d\theta}{dt} = k_d\theta \quad (2.4)$$

$k_d$ : desorpsiyon sabitidir.

Denge durumunda olan bir mekanizmada adsorpsiyon ve desorpsiyon hızları eşit olacağından dolayı;

$$k_a(1 - \theta)C_e = k_d\theta \quad (2.5)$$

denklemi olur. ( Denge durumundaki mekanizmada  $C_e$  : denge konsantrasyonu )

2.5 denklem eşitliğinde

$$K = \frac{k_a}{k_d} \quad (2.6)$$

düzenlemesi yapılırsa

$$\theta = \frac{KC_e}{1+KC_e} \quad (2.7)$$

olarak bulunur. Burada K, adsorpsiyon denge sabiti olarak nitelendirilir.

Denge durumundaki adsorplanan miktarı ise;

$$q_e = q_m \theta \quad (2.8)$$

formülü ile hesaplanır. Buradaki  $\theta$  yerine 2.7de ki denklem yazılıp düzenlenirse;

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2.9)$$

denklemini elde etmiş oluruz. Denklem 2.9 'da verilen  $q_e$ , denge halindeki adsorplanmış miktar,  $q_m$  ise tek tabadaki adsorbanın kapasite miktarını verir. Eğer adsorpsiyon işlemi bu izoterme uyuyor ise bu doğrunun denklemi  $\frac{1}{q_m}$ , kayması ise  $\frac{1}{q_m K}$  değerini elde etmiş oluruz.

### 2.9.3. Brunauer-emmett-teller (BET) izotermi

Adsorbanın üzerinde adsorplanan gaz moleküllerinin sıkışmasıyla birden fazla tabakadan oluşan adsorpsiyon işleminin oluşmasını varsayarak oluşturulan izoterm BET izotermi olarakda bilinir. Aşağıdaki 2.10 denklemde verilen eşitlik Langmuir izoterminden yola çıkarak bütün tabakalara uygulanmasıyla elde edilir.

$$\frac{P/P_0}{n(1-\frac{P}{P_0})} = \frac{1}{nmc} + \frac{c-1}{nmc} \frac{P}{P_0} \quad (2.10)$$

Burada  $P/P_0$  yerine  $C/C_0$  kullandığımızda bu denklem çözümlenmeden adsorpsiyon için kullanılabilir. Deneylerden elde edilen veriler bu denklemde yerine koyulup grafik çizildiğinde  $0.05 < P/P_0 < 0.35$  aralığında verileri buluruz (Şamdan, 2013). Bu doğrunun eğim ve kayması sırayla  $(c-1)/nmc$  ve  $1/nmc$  niceliklerine eşitlendiği bulunacak olan iki denklemin ortak çözümlenmesinden,  $n_m$  ve  $c$  sabiti bulunur (Sarıkaya, 2005).

$P/P_0$ : bağıl denge basıncı

$C/C_0$ : bağıl denge derişimi

$n_m$ : tek tabaka kapasitesi

### 2.10. Adsorpsiyon Kinetiği

Adsorpsiyon işlemi sistemlerin tasarımlarının yapılabilmesi için adsorpsiyon mekanizmasının ve kinetiğinin doğru bir şekilde kavranması gerekmektedir. Adsorpsiyon mekanizmasının nasıl olacağını ve adsorpsiyon süresinin belirlenmesinde kullanılan

eşitlikler kinetik model olarak adlandırılır (Mihçioğur, 2009). Kullanılmış olan adsorbanın fiziksel, kimyasal vb özelliklerine göre adsorpsiyon işleminin mekanizması ve süresini şekillendirmektedir (Hatay, 2006).

### 2.10.1. Sözde birinci mertebeden kinetik model

Lagergren reaksiyonun derecesini belirlemek ve adsorpsiyon işleminin kinetiğini ifade etmek için sözde birinci mertebeden kinetik modeli geliştirmiştir. Bu kinetik modelde adsorplayıcı aktif bölgelerinin adsorpsiyon hızı ile doğru orantılı olduğunu bize göstermiştir. Bu modelin formülü aşağıdaki gibidir;

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.11)$$

Bu denklem üzerinde integral işlemi yaparsak;

$$\ln(q_e - q_t) = -k_1t + C_1 \quad (2.12)$$

ifadesini elde ederiz.

$k_1$ : Bu modele ait hız sabiti (dk-1)

$q_t$ : t süresinde adsorplanan maddenin miktarını gösterir (mg/g)

$C_1$ : Bu modele ait integrasyon sabitidir.

Başlangıç zamanında ( $t=0$ ),  $q_t = 0$  kabulünü yaptığımızda;

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1t \quad (2.13)$$

ifadesini elde etmiş oluruz. Doğru denkleminin grafiğini çizdiğimizde, eğimden hız sabitini ve kesim noktasından ise  $q_e$  değerini elde ederiz (Aksu ve Yener, 2001).

### 2.10.2. Sözde ikinci mertebeden kinetik model

Adsorpsiyonun adsorplayıcının aktif bölgelerine bağlı olduğu kabulünü yapan bu modelde hız belirleyici aşamanın kimyasal adsorpsiyon olduğu varsayımını yapar.

Bu modelin denklemi aşağıda gösterildiği gibidir;

$$\frac{dq}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (2.14)$$

Bu denklemde integral işlemi yaparsak

$$\frac{1}{q e^{-qt}} = k_2 t + C_2 \quad (2.15)$$

elde etmiş oluruz. Grafiğin eğiminden  $k_2$  hız sabitini ve kesim noktalarından da  $q_e$  değerini elde ederiz (Ray vd., 2020).

$k_2$ : reaksiyon sabiti

$C_2$ : integrasyon sabitidir.

### 3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Daha önceki çalışmalar incelendiğinde içerisinde karbon elementi olan her şeyden aktif karbon üretilebileceğini göstermiştir. Yeterli düzeyde karbon içeren, düşük maliyetli ve kolay erişilebilir katı hammaddeler, çevresel ve ekonomik avantajları nedeniyle aktif karbon üretiminde yaygın olarak tercih edilen öncü malzemeler arasında yer almaktadır. Yapılan literatür araştırmalarında kömür, odun, meyve çekirdeği ve kabukları, hindistan cevizi, fındık kabukları ve narince kabukları gibi doğal atık malzemeler kullanılır. Ayrıca aktif karbon polimer bazlı çeşitli organik olmayan endüstriyel atıklardan da üretilmektedir (Bouchelta vd., 2008; Demiral ve Gündüzoğlu, 2010; Toles vd.,1996). Atıksular, içmesuları, gaz maskeleri gibi birden fazla farklı alanda kullanılmaktadır.

#### 3.1. Aktif Karbon Üretimi ve Kullanımı İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Akasya tohum kabuklarından  $H_3PO_4$  ve  $H_2SO_4$  ile aktive edilmesi ile aktif karbon üretilmiş olup, üretilen bu aktif karbonlar ile atıksuların içinde bulunan çözünmüş organik bileşiklerin giderilmesi amaçlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda  $H_3PO_4$  ile üretilen aktif karbonun  $H_2SO_4$  ile üretilen aktif karbona göre iyi gelişmiş gözenekler oluşturduğu, daha büyük yüzey alanına sahip bir mezo gözeneklilik ve mikro gözeneklilik yapısı oluşturduğu gözlemlenmiştir (Daniel vd., 2023).

Şeker kamışı bagası ve ayçiçeği çekirdeği kabuğundan fosforik asit ve çinko klorür aktivasyonu ile hazırlanan aktif karbon üretimi gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, çinko klorür ile üretilmiş olan aktif karbonun yüzey alanı ve gözenek hacmi, fosforik asit ile üretilen aktif karbona göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca baz ile yıkama işlemi gerçekleşen aktif karbonun mezo gözenekli bir yapıya sahip olduğunu ve bu yapının adsorpsiyon kapasitesini olumlu bir şekilde etkilediği bildirilmiştir (Liou, 2010).

Pirinç kabuğundan  $ZnCl_2$  ve  $H_3PO_4$  kullanılarak üretilmiş olan aktif karbonlar ile yapılan deneysel çalışmalar neticesinde daha yüksek derecede daha küçük boyutlu gözenekler geliştirdiği ve gözenek boyutunun kullanılan aktivasyon ajanının çeşidine göre değiştiği kanıtlanmıştır (Konneh vd., 2021).

Şeker kamışı bagası ve pirinç kabuğundan fosforik asit ve çinko klorür kullanılarak üretilen aktif karbonlar incelendiğinde; her iki ürün içinde geçerli olmak

üzere çinko klorür ile aktive edilen aktif karbonların fosforik asite göre daha yüksek yüzey alanı verdiği bulunmuştur (Raut vd., 2022).

Azot ve karbondioksit koşullarında  $ZnCl_2$ ,  $H_3PO_4$  ve  $KOH$  ile aktive edilerek üretilen aktif karbonların incelendiğinde en yüksek mikro gözenek hacmi sırasıyla çinko klorür, fosforik asit ve potasyum hidroksik olduğu tespit edilmiştir (Noor vd., 2009)

Baobab meyve kabuklarının  $ZnCl_2$ ,  $H_3PO_4$  ve  $KOH$  ile aktive edilmesiyle üretilen aktif karbonlar incelendiğinde en büyük yüzey alanına  $KOH$  ajanı ile aktive edilen aktif karbonda olduğu sonucuna varılmıştır (Nedjai vd., 2021).

Söğüt ağacına  $ZnCl_2$  ve  $H_3PO_4$  aktivasyon ajanları ardışık olarak uygulanarak aktif karbonlar üretilmiştir. Aktif karbonlar ile ilgili olarak önce fosforik asit ( $350\text{ }^\circ\text{C}$  de ) daha sonra çinko klorür ( $550\text{ }^\circ\text{C}$  de ) ile muamele edildiğinde daha fazla mikro gözenek yapısı oluşturmuştur. Ancak önce çinko klorür ( $350\text{ }^\circ\text{C}$  de ) daha sonra fosforik asit ( $550\text{ }^\circ\text{C}$  de ) ile muamele yapıldığında daha fazla gözenek oluşturmadığı gibi aktif karbon verimini de azaltmıştır (Liang vd., 2024).

*Euphorbia rigidadan* farklı oranlarla (% 25-50-75-100)  $ZnCl_2$ ,  $K_2CO_3$ ,  $NaOH$  ve  $H_3PO_4$  aktivasyon ajanlarıyla aktive edilen ve üretilen aktif karbonlar ile biyokütleye uygulanmıştır. Deneyle sonucunda maksimum BET yüzey alanı ( $2613\text{ m}^2/\text{g}$ ) % 75  $K_2CO_3$  emdirilmiş biyokütle numunesinden elde edilmiştir (Kılıç vd., 2012).

Üzüm çekirdeklerinden  $K_2CO_3$  ve  $KOH$  kullanılarak üretilen aktif karbonlarda çoğunlukla mikro gözenekli bir yapıya sahip olduğu, aynı konsantrasyon oranında karıştırılan potasyum karbonat ve potasyum hidroksitte aktivasyon sıcaklığındaki artışlar her iki aktif karbon veriminde azalmaya neden olmuştur (Okman vd., 2014).

Potasyum tuzları ( $KOH$ ,  $K_2CO_3$ ) ile mısır koçanından önce kimyasal sonrasında fiziksel aktivasyon ile elde edilen aktif karbonlarda büyük BET yüzey alanları elde edildiği ve asitle yıkanmamış olan aktif karbonlardaki gözenekliliğin, gözeneklerin içerisinde potasyum tuzlarının kalması nedeniyle asitle yıkamaya oranla daha düşük olduğu bildirilmiştir (Tsai vd., 2001).

Pamuk sapından mikrodalga destekli  $KOH$ ,  $K_2CO_3$  kullanarak oluşturulan aktif karbonlar üretilmiştir.  $KOH$  ile üretilen aktif karbon  $K_2CO_3$  ilre üretilene göre daha büyük

mikro gözenek hacmi oluşturduğu, ayrıca geleneksel ısıtma yöntemlerine göre daha kısa sürelerde sonuçlanacağı bildirilmiştir (Deng vd., 2010).

Portakal kabuklarından fosforik asit kullanılarak üretilen aktif karbonlar ile yonga levhaları üretiminde meydana gelene formaldehit gibi uçucu gazların azaltılması amaçlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda aktif karbon eklenmesi yonga levhaların mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirmiş, formaldehit emisyonlarında ise 0 ayda % 28,92, 3 ayda % 45,25 azaldığı tespit edilmiştir (Ergün vd., 2025).

İskoç çamı odun atığından çinko klorür kullanılarak üretilen aktif karbonlar ile yonga levha üretiminde meydana gelen formaldehit uçucu gazın azaltılması ve yonga levhanın fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Aktif karbonlar % 0,5, % 1 ve % 1,5 oranında eklenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda yonga levhaların mekanik ve fiziksel özellikleri iyileşmiştir. Ayrıca 0 ay grubunda % 24,6, 6. Ay grubunda ise % 27 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Ergün vd., 2024).

Selülozdan çinko klorür ve fosforik asit ile aktif karbon üretilerek nitril bütadien kauçuk / doğal kauçuk bileşenlerinde farklı oranlarda (% 0, % 5, % 10, % 15 ve % 20) dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, aktif karbon ilavesinin kauçuk karışımlarının mekanik özelliklerini (sertlik, çekme mukavemeti ve birim uzama) iyileştirmiştir (Bülbül ve Ergün, 2024).

Atık kağıtdan çinko klorür ve fosforik asit ile üretilen aktif karbonların özellikleri incelenmiş ve ticari aktif karbon ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda atık kağıtdan üretilmiş olan aktif karbonların ticari aktif karbonlara kıyasla daha iyi gözenek ve yüzey alanına sahip olduğunu göstermiştir (Ödemir vd., 2023).

Atık kâğıttan çinko klorür ve fosforik asit ile üretilen aktif karbonlar kauçuk matrisli karışım ile karıştırılmıştır. Deneyler elde edilen verilere göre dolgu malzemelerinin artışına göre yoğunluğun azaldığı, sertlik değerinin arttığı, kopma dayanımlarının azaldığı gözlemlenmiştir (Özdemir, 2023).

### **3.2. Aktif Karbon İle İlgili Adsorpsiyonu Çalışmaları**

Nem giderme işlemi için biyokütleden üretilmiş olan aktif karbonun nem giderme performansı silika jel ile karşılaştırıldığında; üretilmiş olan bu aktif karbonun su adsorpsiyon kapasitesi oldukça yüksek olduğu görülmüştür (Chairunnisa vd., 2021). Bu

yapılan çalışmadan yola çıkarak elde edilmiş verilere göre; üretilmiş olan aktif karbonun nem giderme kapasitesinin silika jelden daha yüksek olduğu ve silika jele bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Başka bir çalışmada atık ile atık giderimi amacıyla aktivatör ajanı olarak fosforik asit kullanılarak atık biyo kütlede aktif karbon üretilmiş, üretilen bu aktif karbon ile hava içerisinde bulunan toluenin adsorplanması yapılmıştır (Zhang vd., 2021). Yapılan bu çalışmada toluen için adsorpsiyon kapasitesinin 417 mg/g' a kadar ulaştığı görülmüştür. Elde edilen bu veriler doğrultusunda da atık biyo kütlede üretilmiş olan bu aktif karbon ile hava içerisinde bulunan toluenin gideriminde kullanılması geleceğe yönelik çalışmalara ilham olacağı düşünülmüştür.

Çam ağacı, hindistan cevizi kabuğu, kömür ve karbon nano tüpü olmak üzere 4 adet farklı toz aktif karbon kullanılarak sülfametoksazolün (SMX) adsorpsiyonu yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Ancak yapılan çalışmadan çıkan verilerde SMX'in adsorpsiyonu için çam ağacı kabuğu aktif karbonu ve karbon nano tüp ile verimli sonuç alınmıştır. Çam ağacı kabuğunda üretilmiş olan aktif karbonun karbon nano tüp adsorpsiyonundan yaklaşık olarak 4,6 katı ile en iyi adsorpsiyon yaptığı sonucuna ulaşılmıştır (Tonucci vd., 2015).

Peganum Harmala tohumundan üretilen aktif karbon ZnO( Çinkooksit ) ile kaplanarak Cr(VI) giderimin de kullanılmıştır. Yüzey alanı BET analizi ile 442 m<sup>2</sup> /g olarak bulunmuş ve ZnO ile kaplanmış olan aktif karbonun sorpsiyon kapasitesi kayda değer bir artış göstermiştir (Fazlzadeh vd., 2017). Ayrıca adsorpsiyon kapasitesinin sıcaklığın etkisi yüzünden arttığı gözlemlenmiştir.

Kahve kabuklarından fizikokimyasal aktivasyon yöntemiyle üretilen aktif karbonla sulu çözeltilerden Remazol Brilliant Orange 3R ( RBO3R) boyasının giderilmesi amaçlanmış olup, yapılan bu çalışmada boya konsantrasyonu, temas süreleri, çözelti sıcaklıkları ve pH'ların adsorpsiyon üzerinde etkisi incelenmiştir (Ahmad ve Rahman, 2011). Elde edilen sonuçlara göre kahve kabuklarından fizikokimyasal yöntemlerle üretilmiş olan aktif karbonların RBO3R boyasını gideriminde kullanılması mümkündür.

Mezbaha atık sularının içinde bulunan nitrit ve nitratın pirinç kabuğu, hindistan cevizi kabuğu ve kahve kabuğundan üretilen biochar kullanılarak adsorpsiyonu

amaçlanmış olup, çalışma verilerine göre ile üretilmiş olan biochar türlerinin mezbaha atık sularında bulunan nitrit ve nitrat adsorpsiyonunda verimli bir şekilde kullanılabilceği görülmüştür (Konneh vd., 2021).

Muz sapından aktivatör ajanı olarak  $H_3PO_4$  kullanılarak üretilen aktif karbon ile metilen mavisi giderimi amacı ile yapılan çalışmada çeşitli temas sürelerinde aktif karbon dozunun etkisi incelendiğinde düşük dozlarda 90 dakika adsorpsiyon işleminde 50 g/mL konsantrasyonunda olan metilen mavisinin tamamının giderildiği tespit edilmiştir (Misran vd., 2022). Bunun yanı sıra konsantrasyon değerlerinin artmasına paralel olarak verimliliğin yükseldiği çalışmada belirtilmiştir. Bu çalışmadan anlaşılacağı üzere aktif karbon metilen mavisinin giderilmesinde herhangi bir yenilenme işlemine tabi olmadan 6 defaya kadar kullanılması yüksek verimli ve çevre dostu olduğunu gösterir.

Boya endüstrisi atıklarından anilin sarısı gideriminde kullanılmak üzere kahve çekirdeklerinden aktivasyon ajanı olarak potasyum hidroksit kullanılarak aktif karbon üretilmiştir. 35 ppm anilin sarısı giderimi için, 0,6 g adsorban miktarı ve 2,5 saat bekleme süresinde % 88,722 oranında bir giderim elde edilmiştir (Pagalan vd., 2020). Elde edilen bu verilere göre anilin sarısının giderilmesinde, üretilmiş olan bu aktif karbonun etkili olduğu sonucuna varılabilir.

Zeolit ile zenginleştirilen yağ palmi külünün NaOH aktivasyonu ile aktif karbon üretilerek metilen mavisi giderimi amaçlanmıştır. Boya konsantrasyonunun (25–400 mg/L), sıcaklığın (30 °C–50 °C) ve pH'nın (3–13) olduğu koşullarda zeolit ile zenginleştirilmiş yağ palm külünden üretilen aktif karbon kompozitinin metilen mavisi gideriminde kullanılabilceği görülmüştür (Khanday vd., 2017).

Mısır koçanından potasyum hidroksit ve amonyum sülfat kullanılarak mikrodalga aktivasyon yöntemiyle üretilmiş olan aktif karbonlar ile sulu çözeltilerden metilen mavisi giderimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir (Medhat vd., 2021). Yapılmış olan bu çalışma ile mısır koçanından üretilmiş olan aktif karbonlar ile verimli bir şekilde sulu çözeltilerden metilen mavisi giderimi gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

Pirinç ve kahve kabuklarından  $ZnCl_2$ 'nin aktivatör ajanı olarak kullanılmasıyla üretilen aktif karbonlar ile tekstil atıksularında bulunan indigo karmin maddesinin giderimi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre üretilen bu aktif karbonların indigo karmin maddesinin giderimi verimi yüksek olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca ticari olarak

bilinen aktif karbona kıyasla kahve kabuklarından elde edilmiş olan aktif karbonun kapasitesi oldukça yüksek olduğu görülmüştür (Paredes-Laverde vd., 2021).

Mısır koçanından üretilmiş olan aktif karbon ile bakır ve nikel gideriminde Ph, konsantrasyon ve sıcaklığın etkisi araştırılmıştır (Campos vd., 2020). Üretilen bu aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesi bakır gideriminde 0,39 mmol/g, nikel gideriminde ise 0,28 mmol/g olarak gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışma ile ticari olarak herhangi bir getirisi olmayan ve bol miktarda bulunan bir atığın istenilmeyen metallere giderilmesinde verimli bir yol olarak kullanılabilinmektedir.

Pirinç kabuğundan piroliz yöntemi ile aktivasyon ajanı olarak KOH ve EDTA-4Na modifikasyonu ile üretilmiş olan aktif karbon ile sudan fenol adsorpsiyonunda kullanılmıştır (Lv vd., 2020). Koşulların optimum olması durumunda KOH aktivasyonu ve EDTA-4Na modifikasyonu ile üretilmiş olan aktif karbonun BET ölçümü sonucunda yüzey alanı 1368 m<sup>2</sup> /g ve en yüksek adsorpsiyonu 215,27 mg/g olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre pirinç kabuğundan üretilmiş olan aktif karbonların hem yüzey alanı hem de aktivasyon kapasitesi gibi özellikleri bu üretim yöntemlerinin etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Portakal kabuğundan üretilmiş olan aktif karbon ile belirli deney parametrelerinde (adsorban dozu, konsantrasyon, sıcaklık, temas süresi ve pH gibi ) metilen mavisi adsorpsiyon kapasitesini belirlemek için deneyler yapılmış ve maksimum metilen mavisi giderimi; adsorban dozu, konsantrasyon, sıcaklık ve Ph'ın sırasıyla 0,8 g/L, 100 ppm, 60°C ve 11 parametrelerinde elde edilmiştir (Gupta vd., 2022). Bu çalışmadan elde edilen verilere göre portakal kabuğundan üretilmiş olan aktif karbon ile metilen mavisi içeren sulu çözeltilerde metilen mavisinin gideriminde kullanılabileceği görülmüştür.

Cassia Bakeriana tohum kabuklarından piroliz işlemiyle üretilen aktif karbonlar ile sulu çözeltilerden metilen mavisi, kongo kırmızısı ve siprofloksasin antibiyotiklerinin giderimi başarılı bir şekilde sağlanmıştır (Theamwong vd., 2021). Elde edilmiş olan sonuçlara göre atık Cassia Bakeriana tohum kabuklarından üretilmiş olan aktif karbonlar ile atık sularda bulunan kirleticilerin giderilmesinde oldukça kullanışlı olduğunu göstermiştir.

Kestane kabuğu atıklarından aktivasyon sıcaklıkları değiştirilerek farklı türden manyetit aktif karbonlar üretilmiş ve üretilen bu aktif karbonlar ile belirli bir sıcaklıkta

(150 C<sup>0</sup>'de) Hg adsorpsiyonu yapılması amaçlanmış olup; yapılan bu çalışmada manyetit miktarının en yüksek olan ve 500-600 C<sup>0</sup> 'de elde edilmiş olan aktif karbonlarda en iyi sonuçlar elde edilmiştir (Rodríguez-Sánchez vd., 2022). Elde edilen bu verilere göre üretilmiş olan aktif karbonun gaz atmosferinde bulunan Hg'nin giderilmesinde de çok etkili bir adsorban olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Badem kabuklarından amonyak gazında ısı işlem ve CO<sub>2</sub> aktivasyonu ile 2 cins aktif karbon üretilmiştir. Her iki üretim prosüdüğü sonucu oluşan aktif karbonların % 15 CO<sub>2</sub> içeren karışımında yüksek karbondioksit adsorpsiyon verimi gerçekleşmiştir (Plaza vd., 2010). Yapılan bu çalışmada karbon dioksit ile aktivasyon sonucunda numunelerde daha çok mikro gözenek alanlarında kayda değer şekilde gözenekliliği arttırken, 800 °C'de aminasyon prosüdüğü ile üretilen aktif karbonda orta mertebede dar mikro gözenekliliği geliştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca amonyak gazı altında ısı işleme tabi tutularak üretilen aktif karbonların karbon verimlerinin yüksek olması ve ıslatma sürelerinin daha kısa olmasından dolayı iki avantaj sağlamıştır.

Çörek otu tohumlarının aktivasyon ajanı olarak belirli oranlarda sülfirik asit kullanılması ile üretilen aktif karbon ile sulu çözeltilerden metilen mavisi ve kurşun iyonlarının giderilmesi amaçlanmış olup; yüksek oranda metilen mavisi ve kurşun iyonları giderimi gerçekleşmiştir (Thabede vd., 2020).

Hindistan cevizi kabuğundan farklı aktivasyon ajanı olarak kullanılarak üretilen aktif karbonlar ile benzen ve sikloheksanı ayırmak amacıyla yapılan çalışmada benzen için adsorpsiyon kapasitesi 1,35 ile 51,40 mmol/g, sikloheksan için 0,49 ile 25,2 mmol/g arasında olduğu gözlemlenmiştir. Aktif karbonlar arasında en yüksek verim ZnCl<sub>2</sub> ile aktive edilen aktif karbonlarda gözlemlenmiştir (Valencia vd., 2022). Üretilmiş olan bu aktif karbonların benzen ve sikloheksan ayırımı gerçekleşmesinde daha az maliyetli ve endüstri sektöründe kullanılması ergonomik olacağı düşünülmektedir.

Çörek otu tohumundan asitle, baz ile muamele edilerek üretilen ve herhangi bir işlem yapılmadan elde edilen adsorbanların ile sulu çözeltilerin içinde bulunan kobalt (Co(II)), kurşun (Pb(II)), bakır (Cu(II)) ve nikelin (Ni(II)) gibi katyonik kirleticilerin uzaklaştırılması hedeflenmiştir (Shooto vd., 2019). Yapılan bu çalışmada Cu(II) için baz ile muamele edilerek üretilmiş olan adsorbanlar; Pb(II) için asitle muamele edilerek üretilmiş olan adsorbanlar ve herhangi bir müdahale olmadan üretilmiş olan adsorbanların

en verimli şekilde adsorpsiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan çıkarılan sonuca göre adsorpsiyon kapasitesinin verimi sırasıyla baz ile muamele edilmiş, asit ile muamele edilmiş ve herhangi bir müdahalenin olmadığı çörek otu tohumu olarak sıralayabiliriz. Elde edilen verilere göre üretilmiş olan adsorbanların atık suların içinde bulunan katyonların adsorpsiyonunda tekrar tekrar kullanılabilceğini çıkarımına ulaşılmıştır.

Çörek otu posasından aktivasyon ajanı olarak  $ZnCl_2$  kullanılması ve kimyasal aktivasyon yöntemiyle üretilen aktif karbon ile farklı çinko klorür emdirme miktarlarında (1:1 ve 2:1) üretilen aktif karbonların yüzey alanları  $505,073 \text{ m}^2 / \text{g}$  ve  $276,563 \text{ m}^2 / \text{g}$  bulunmuştur (Aslan, 2021). Bu sonuçlara göre çörek otu posasından da aktif karbon üretimi yapılabilirliği ortaya çıkmıştır.

Atık lastik termal olarak işlenerek ve aktive edilerek üretilen aktif karbonlar ile sudan krom giderimi hedeflenmiştir (Gupta vd., 2013). Üretilen bu aktif karbon kromun (III) potansiyel adsorban giderimi için temas süresi, başlangıç konsantrasyonu, adsorban dozajı ve pH gibi değişken parametrelerde test edildi. 1 saat sürede dengeye gelerek hızlı krom iyonu adsorpsiyonu gerçekleştirilmiştir. Elden edilen verilere göre adsorpsiyonun pH'a bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Çalışmadan çıkan sonuçlar sürekli miktarda artan atık lastiklerden üretilen aktif karbonların atık su arıtımında kullanılmasında küresel çapta maliyetlerin ve çevre sorunlarının ortadan kaldıracağı düşünülmektedir.

Çörek otu tohumundan aktivasyon ajanı olarak fosforik asit ve potasyum permanganat kullanılarak üretilmiş olan aktif karbonla sulu çözeltilerden krom (Cr (VI)) ve toksik kadmiyum (Cd(II)) giderilmesi amaçlanmıştır (Thabede vd., 2020). Yapılan çalışmalardan elde edilen verilere göre üretilen aktif karbonlar ile Cd(II) giderimi Cr(VI) giderimine göre daha çok verim alınmıştır. Buradan anlaşılacağı üzere aktive edilmiş ya da herhangi bir işlem yapılmamış olan çörek otu tohumunun adsorban olarak kullanılabilceği görülmüştür.

Cheddar peynir altı suyunun rengi ve artık norbiksin içeriğinin giderilmesi amacı ile yapılan bu çalışmada aktif karbonun hidrojen peroksit ile yapılan ağartmadan daha verimli olduğu, ayrıca kullanılan aktif karbonun 10 kez rejenerasyondan sonra bile % 50'den fazla norbiksini giderdiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar bize gösteriyor ki peynir altı suyunun renginin giderilmesinde aktif karbon büyük potansiyele sahiptir (Zhang vd., 2015).

700, 800 ve 900 °C de buhar aktivasyonu ile şeker kamışı küspesi ve küspe uçucu külünden üretilen aktif karbonlar ile renk giderimi için yapılan çalışmada adsorbanın gözenek boyutunun adsorpsiyon kapasitesinde önemli derecede etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 900 °C'de uçucu külden elde edilen aktif karbonun termal rejenerasyondan sonra şurup renk giderme kapasitesinin iyi olduğu gözlemlenmiştir (Wibowo vd., 2024).

İyot ve melas çözeltilisinden şeker şurubunun renk giderimi için iki ticari aktif karbon ve pancar küspesinden üretilen farklı sekiz aktif karbon kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmanın sonucunda iki ticari aktif karbonun fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak renk giderme verimlilikleri farklıydı. Pancar küspesinden, CO<sub>2</sub> 'nin aktivasyon ajanı olarak, 750 °C'de ve 5 saat boyunca muamele edilerek üretilen aktif karbonun renk giderim verimliliği en yüksek olduğu, ayrıca kullanılmış olan ticari aktif karbonlardan daha iyi verimli olana yakın bulunduğu görülmüştür (Mudoga vd., 2008).

İran'ın Meşhed kentindeki belediye atık su arıtımı işleminde kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve biyolojik oksijen ihtiyaçlarını (BOİ) azaltmak için granüler aktif karbon kullanıldığı, yapılan bu çalışmada farklı granüler aktif karbonlar ile farklı temas zamanları ve dozaj miktarlarında KOİ ve BOİ adsorpsiyonu yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda 0,25 dozajında dojlanan aktif karbon ile sırasıyla % 91 ve % 93 KOİ ve BOİ giderimi gerçekleştirilmiştir (Zahmatkesh vd., 2023).

Kütle bazında demir emdirilmiş (HDFe) ve amonyakla işlenmiş (HDN) aktif karbonlar, işlenmemiş GAC'den önemli ölçüde daha yüksek DOM alımı göstermiştir. HDFe'nin artan DOM ( doğal organik madde ) alımı, karbon yüzeyindeki demir türlerinin varlığına bağlanırken, HDN'nin DOM alımında daha yüksek olması ise daha çok genişlemiş olan karbon gözeneklerine ve amonyak muamelesi sonrasında oluşan bazik yüzeylere bağlanmıştır (Cheng vd., 2005).

Doğal sulara çözülmüş halde bulunan doğal organik maddenin (DOM) giderimi için iki farklı granül halde bulunan F400 (kömür bazlı) ve Makro (odun bazlı) aktif karbonlar (GAC) ile farklı özelliklere sahip 24 aktif karbon üzerinde çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada yüzey alanı kimyasal özellikleri adsorpsiyonu etkilemiştir. Ph'ın nötr olduğu durumda, bazik ve pozitif yüklü yüzeylere sahip olan aktif karbonlar negatif yüklü halde bulunan doğal organik madde moleküllerinin adsorpsiyonu, yüzey asidik

özelliklere sahip aktif karbonlara göre daha verimli olmuştur. Yüksek sıcaklıkta işlenmiş olan oksitlenmiş aktif karbonların erişebilir yüzey alanlarının artması ve yüzeyinde bazlıkta meydana gelen artışların sonucunda DOM alımının büyük oranda arttığı görülmüştür. Ayrıca bu aktif karbonlara demir emdirilmiş ve yüzey yükü negatif değilse, demir yüklenmiş aktif karbon yüzeylerinin DOM türlerine karşı afinitesinde artış gözlemlenmiştir (Dastgheib vd., 2004).

Tekstil atık atıklarından biyolojik oksijen ihtiyacının ve kimyasal oksijen ihtiyacının giderilmesi amacıyla şeker kamışı küspesinden hazırlanmış olan aktif karbonlar kullanılmıştır. Tepki yüzey metodolojisi (RSM) kullanılarak üretilen aktif karbonların BOİ ve KOİ giderme verimliliğine bakmak için aktif karbonların dozu, pH ve reaksiyon süresine göre yönelik optimum değerleri yakalamak için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel modele göre optimum değerler; 0,915 g/L aktif karbon dozu, 3,225 pH ve 98,91 dakikalık sürenin maksimum BOİ ve KOİ giderim verimliliği için yeterli olacağı belirlendi (Beyan vd., 2021) .

Avacado kabuklarından üretilmiş olan aktif karbon ve ticari aktif karbon ile kahve işleme tesisinden çıkan atık sulardan kimyasal oksijen ihtiyacının ve biyolojik oksijen ihtiyacının azaltılmasını anlamak ve karşılaştırmak için deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde avokado kabuğundan üretilen aktif karbonun en iyi çalışma koşullarında kimyasal oksijen ve biyolojik oksijen giderimi sırasıyla % 98,20 ve % 99,18 olurken, ticari aktif karbonda ise bu oran % 99,02 ve % 99,35 bulunmuştur. Avacado kabuğundan üretilmiş olan aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesi, kimyasal oksijen ve biyolojik oksijen ihtiyacının azaltılmasında ticari aktif karbon gibi kullanılabilir olduğundan, evsel atık suların arıtılmasında avantajlı bir yöntem olabileceği öngörülmüştür (Devi vd., 2008).

Bambu atıklarının fosforik asit ile muamelesi ile kimyasal aktivasyon yöntemiyle hazırlanmış olan aktif karbonlar ile kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve tekstil fabrikası atık suyundan renk giderimi için yapılan çalışmada renk ve kimyasal oksijen gideriminde sırasıyla en yüksek olarak % 91,84 ve % 75,21'lik giderim elde edilmiştir (Ahmad ve Hameed, 2009).

Tekstil arıtma çamurundan aktivasyon ajanı olarak potasyum hidroksit kullanılarak Tepki Yüzey Metodolojisi (RSM) ile elde edilen tekstil arıtma çamuru aktif

karbonu ile sulu çözeltilerden Synozol Blue reaktif (RSB) ve Setapers Sarı-Kahverengi (P2RFL) endüstriyel tekstil boyalarının uzaklaştırılmasında en iyi koşulların belirlenmesi amacıyla deneyler yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda en iyi boya giderimi işlemi en büyük BET yüzey alanına sahip olan TSSAC (336 m<sup>2</sup>/g) da olmuştur. Maksimum giderim kapasitesi sırasıyla (RSB) ve (P2RFL) 8,5383 mg/g ve 5,4 mg/g olmuştur (Kacan, 2016).

Fes bölgesinden toplanan atık sulardan KOİ'nin uzaklaştırılmasında kullanılmak için hünap kabuklarından aktivasyon ajanı olarak potasyum hidroksit (KOH) kullanılarak kimyasal aktivasyonu ile hazırlanan düşük maliyetli aktif karbonlar ile deneyler yapılmıştır. Yapılan bu deneylerden sonra çeşitli adsorpsiyon izotermi ve kinetik modellerine uyarlandığında, Langmuir izoterminin, KOİ denge verilerine iyi uyduğu; kinetik veriler ise sözde ikinci dereceden modele uyduğu görülmüştür. Ayrıca aktif karbon optimum 0,5 g dozda % 72 KOİ ve % 83 renk giderimi sağlamıştır (Kachabi vd., 2019).

Bambu atıklarından (BMAC) aktivasyon ajanı olarak fosforik asit (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) kullanılarak kimyasal aktivasyon yoluyla üç hazırlama değişkeninde (aktivasyon sıcaklığı, aktivasyon süresi ve H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> dozajı) hazırlanan aktif karbonlar ile pamuklu tekstil fabrikası atıksuyunun kimyasal oksijen ihtiyacının (KOİ) ve renginin giderilmesinde kullanılmıştır. 556 °C 'de, 2,33 saat muamelede ve 5,24 fosforik asit oranı kullanılarak elde edilen bu aktif karbonlar ile % 93,08 renk ve % 73,98 KOİ giderimi sağlanmıştır (Ahmad ve Hameed, 2010).

Karbonize hurma çekirdeklerinden (ADP), pirinç kabuğundan (ARH) elde edilen aktif karbon ve ticari aktif karbon (CAC) ile reçine üretim tesisleri atık sularındaki KOİ'nin farklı adsorban dozajı, temas süresi ve pH gibi çeşitli parametrelerde giderimi amaçlanmıştır. Sırasıyla % 92,4, % 90,3 pH 2'de 30 g/L CAC kullanılarak, 40 g/L ADP kullanılarak ve 60 g/L ARH kullanılarak % 88,9'luk maksimum KOİ giderimi sağlanmıştır (El-Dars vd., 2013).

Yüzey kimyası HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> kullanılarak H<sub>2</sub> veya N<sub>2</sub> akışı altında termal işlemler yoluyla dokusal özellikleri önemli ölçüde değiştirilmeden işlem yapılan ticari aktif karbonlar ile anyonik ve katyonik boyaların adsorpsiyonu amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada H<sub>2</sub> akışı altında ve 700 °C'de ısıl işleme üretilmiş olan numune ile söz konusu boyaların çoğunun adsorpsiyonu en verimli bir şekilde gerçekleşmiştir. Aktif karbonların

yüzey bazlılığı adsorpsiyon işleminde anyonik boyalar (reaktif, direkt ve asit) ile yakın bir ilişki gösterirken, katyonik boyalarda (bazik) ise asidik yüzeyler daha verimli adsorpsiyon gerçekleştirmiştir. Bu sonuçlara göre tekstil atık sularından renk gideriminde aktif karbonun verimli bir adsorban olduğu doğrulanmıştır (Pereira vd., 2003).

Kayda değer olmayacak şekilde organik kirleticilerin sulu çözeltilerden etkili bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla, üç aktivasyon sürecine ve dört farklı yüzey kimyasına sahip bir aktif karbon üretilerek ve karakterize edilmiştir. Bunlara ek olarak üç granüler aktif karbon çeşidinde de çalışma yapılmıştır. Bu aktif karbonlar ile içme suyunda kirletici madde olarak yaygın olan, sırasıyla polar olan ve olmayan metil tersiyer-bütül eter (MTBE) , trikloroeten (TCE) adsorbe edilmiştir. TCE 7-10 Å, MTBE 8-11 Å genişlik aralığındaki mikro gözeneklerde adsorbe edilmiştir. Hidrofilik adsorbanlar hidrofobik adsorbanlara göre, her iki kirleticiyi de sulu çözeltilerden daha az uzaklaştırmıştır. Oluşan bu durumu ise hidrofilik yüzeylerde daha çok su adsorpsiyonu ile açıklanmıştır (Li vd., 2002).

Su kaynaklarında tat ve kokuyu etkileyen 2-Metilizoborneol (MIB) giderilmesi amacıyla aktif karbon kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmanın sonucunda kullanılmış olan aktif karbonların mikro gözenekli olması koşuluyla, daha fazla MIB absorbe edebilmesi için daha az hidrofilik karbonlar kullanılması gerektiği tespit edilmiştir (Pendleton vd., 1997).

Aktif karbonun su ve atık suda bulunan farklı kirletici türleri üzerinde adsorpsiyon potansiyelini arttırmaya yönelik yapılan bu çalışmada, genellikle aktif karbonun asitle muamele edilmesi sonucunda, metal iyonlarının adsorpsiyonunda daha iyi olduğu, aktif karbonun baz ile muamelesinde ise, sulu çözeltilerde anyonik türlerin adsorpsiyonunun daha iyi olduğu tespit edilmiştir (Bhatnagar vd., 2013).

Hindistan cevizi (*Cocos nucifera*) endokarpından aktivasyon ajanı olarak fosforik asit kullanılarak 700°C sıcaklıkta 30 dakikalık muamele süresinde aktif karbon üretilmiştir. Üretilen bu aktif karbonlar ile suyun rengin azaltılması ve kalitesinin artırılmasındaki katkısını anlamak amacıyla çalışma yapılmıştır, Yapılan çalışmada renk ve bulanıklığın azaltılmasında en iyi giderim yüzdelerinin sırasıyla % 97,56 ve % 97,11 oranında olduğu belirlendi (Azabache Liza vd., 2022).

Granüler aktif karbon (GAC) ile aşağı akışlı bir mikrofiltrasyon (MF) işleminde, hem organik madde hem de bulanıklığı azaltmak için yapılan deneylerde tüm granüler aktif karbonların en az % 80 oranda bulanıklık giderdiği tespit edilmiştir (Hatt vd., 2013).

Aktif karbon ile yapılan adsorpsiyon çalışmasında bulanıklığın giderilmesinde oldukça verimli olduğu ve Ph değerinin artması ile giderme verimliliğinin arttığı gözlemlenmiştir (Mohammed, 2015).

Mısır koçanı ve talaşının aktivasyon ajanı olarak fosforik asit ve potasyum hidroksit kullanılması elde edilen aktif karbonlar ile Minia bölgesinde içme suyu kaynağı olan İbrahimiya kanalından alınan ham su numunelerinin renk ve bulanıklık giderimi amaçlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda 30 dakika gibi bir bekleme süresince maksimum giderim sırasıyla % 98 ve % 90 ve renk için % 87 ve % 78 olmuştur. Bu sonuçlara göre her iki adsorbanın da verimli bir şekilde atık sularda bulunan bulanıklığın ve rengin giderilmesinde kullanılabileceğini, fakat bu iki aktif karbondan mısır koçanından üretilen aktif karbonun mısır talaşından daha verimli olduğu görülmüştür (Barakat vd., 2023).

19 farmasötik bileşiği ve 9 pestisitinin uzaklaştırılması amacıyla toz halinde bulunan aktif karbon ile bazı pilot çalışmalar yapılmıştır. Yapılmış olan dört farklı çalışma şartlarında, değişik aktif karbonlar ile farklı dozlarda ve temas sürelerinde çalışma yapılmıştır. 3–9 mg/L mezogözenekli aktif karbonlar ve 20–24 mg/L mikro gözenekli aktif karbonlar ile farmasötikler için % 65-79, pestisitler için % 73-83'lük giderim sağlanmıştır. Yapılan bu çalışmada mikro kirleticilerin yük, hidrofobiklik ve aromatiklik gibi temel özellikleri adsorpsiyonu etkilemekte olduğunu göstermiştir. Hidrofobikliği daha düşük olan bileşiklerde, fonksiyonel grupların pozitif yüklü olması, yüzey polar alanının daha düşük olan ve aromatik halka sayısının yüksek olması adsorpsiyon işleminin daha verimli olmasını sağlamıştır. Ayrıca yükü pozitif olan bileşikler, negatif yük olanlara göre daha verimli adsorpsiyonu yapılmıştır (Campinas vd., 2021).

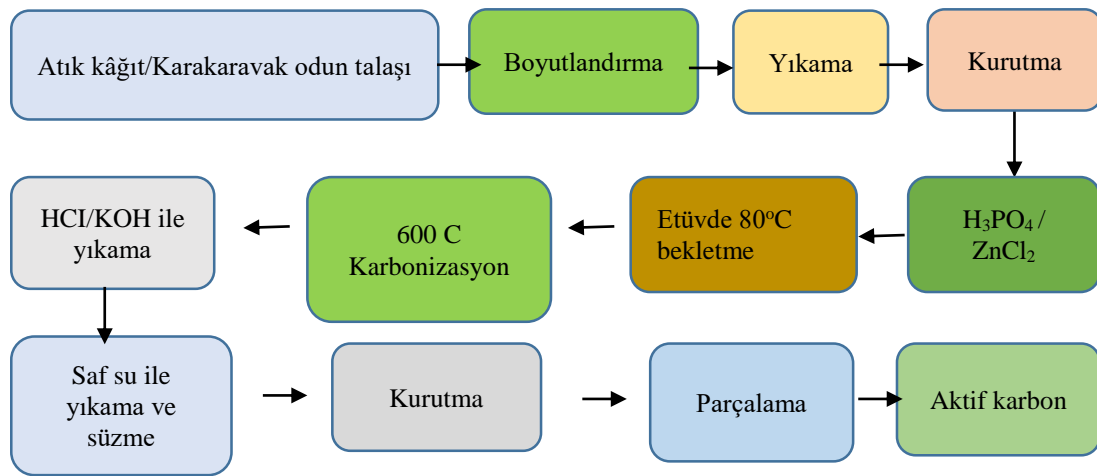
Farklı yüzey çeşitlerine sahip yedi farklı aktif karbon ile doğal organik maddenin (DOM) farklı pH değerlerinde, yüksek ve düşük iyonik kuvvette adsorpsiyonu incelenmiştir. Yedi karbondan altısında yüzeyin düşük konsantrasyonlarında iyonik kuvvetin artmasından dolayı adsorpsiyon mekanizmasını azalttığı, yüzey konsantrasyonu

artması ile beraber adsorpsiyon izotermine yaklaştığı, ardından tuz eklenmesinde adsorpsiyon işleminin artmasına sebep olduğu görülmüştür (Bjelopavlic vd., 1999).

## 4. MATERYEL VE YÖNTEM

### 4.1. Aktif Karbon Üretimi

Bu çalışma kapsamında karakavak odun talaşı ve atık kâğıt;  $H_3PO_4$  ( fosforik asit ) ve  $ZnCl_2$  (çinko klorür) kullanılarak aktive edilmiştir. Üretilmiş olan bu aktif karbonlar hidroklorik asit ve potasyum hidroksit ile yıkama işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 4.1 'de atık kâğıt ve karakavak odun talaşından aktif karbon üretimi gösterilmiştir. Şekil 4.2'de aktif karbon üretiminde kullanılan aletler gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Atık kâğıt ve Karakavak odun talaşından aktif karbon üretim şeması



Şekil 4.2. a) Etüv b) Manyetik karıştırıcı c) Öğütücü makinesi d) Tav fırını

#### 4.1.1. Fosforik asit ile aktif karbon üretimi

Ayrı ayrı işlemler olmak üzere 3 kg atık kâğıt ve 3 kg karakavak odun talaşı parçalanıp küçültükten sonra 1,5 litre fosforik asit (50 % wt.) ve 3 litre saf su eklenerek karıştırılmıştır. Oluşan bu karışımın reaksiyonu için 2 saat sürede 110 °C'de işlem yapılmıştır. Oluşturulan bu karışım bir sonraki aşama olan kurutma işlemine alınmıştır. Kurutma işlemi 80 °C'de 24 saat bir etüvde bekletilerek tamamlanmıştır. Kurutma işlemi tamamlanmış olan ürünler argon gazı (50 mililitre/dakika) altında, 1,5 saat 600 °C'de tav fırınında karbonizasyon işlemine tabi tutularak oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. 0.5 ml KOH ile yıkama işlemi sonrasında pH değerinin 6-6,5 olması amacıyla sıcak deiyonize su ile yıkama işlemi yapılmıştır. Yıkama ve süzme işlemi biten aktif karbon 6 saat sürede 100 °C'de etüvde kurutularak öğütücü makinesi ile öğütülmüştür.

#### 4.1.2. Çinko klorür ile aktif karbon üretimi

Ayrı ayrı işlemler olmak üzere 3 kg atık kâğıt ve 3 kg karakavak odun talaşı parçalanıp küçültükten sonra 1,5 litre çinko klorür (50% wt.) ve 3 litre saf su eklenerek karıştırılmıştır. Oluşan bu karışımın reaksiyona için 2 saat sürede 110 °C'de işlem yapılmıştır. Oluşturulan bu karışım bir sonraki aşama olan kurutma işlemine alınmıştır. Kurutma işlemi 80 °C'de 24 saat bir etüvde bekletilerek tamamlanmıştır. Kurutma işlemi tamamlanmış olan ürünler argon gazı (50 mililitre/dakika) altında, 1,5 saat 600 °C'de tav fırınında karbonizasyon işlemine tabi tutularak oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. 0.5 ml KOH ile yıkama işlemi sonrasında pH değerinin 6-6,5 olması amacıyla sıcak deiyonize su ile yıkama işlemi yapılmıştır. Yıkama ve süzme işlemi biten aktif karbon 6 saat sürede 100 °C'de etüvde kurutularak öğütücü makinesi ile öğütülmüştür.

#### 4.2. Yapılan Deneysel Çalışma

Farklı üretim yöntemleri ile üretilmiş olan aktif karbonların öncelikli olarak BET yüzey analizleri, FE-SEM görüntüleri, FT-IR analizleri ve yoğunluk analizleri yapılmıştır. Adsorpsiyon deneyleri için Atıksu Arıtma Tesisi girişinden alınan numuneler 500 ml olacak şekilde şişelere konulmuş ve numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin deneyleri akaratide bir kurumda yapılmıştır. Her bir deney numunesi için Ph, Elektrik İletkenliği, Renk, Bulanıklık, KOİ değerlerine bakılmıştır.

#### 4.2.1. Yüzey analizi ve porozite (BET) analizi

Aktif karbonların BET analizi Quantachrome – Quadrasorb Evo 4 cihazı ile yapılmıştır. Bu cihaz ile Brunauer, Emmett ve Teller (BET) methoduyla 77 K'deki sıvı azot ortamında, azot (N<sub>2</sub>) gazı adsorpsiyonu tekniğine dayalı olarak yüzey alanı ve gözeneklilik ölçümü yapılmaktadır. Aynı anda 4 numune için ölçüm yapılabilmektedir. Gözenek boyutu aralığı 3,5 Å ila >4000 Å (0,35 nm ila >400 nm)dir. Gözenek hacmi saptanabilir sınır <0.0001 cc/g. 63,7 cm x 53,3 cm x 73,6 cm boyutlarında, 57,5 kilo ağırlığında, elektrik ihtiyacı 100 VAC ila 240 VAC, 50/60 Hz olan ve % 90 maksimum bağıl nemde 10 °C ila 38 °C çalışma aralığında çalışır. Şekil 4.3'de BET analizi cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4. 3. Quantachrome – Quadrasorb Evo 4

#### 4.2.2. Alan taramalı elektron mikroskobu ile görüntüleme ( FE-SEM )

Atık kâğıttan ve karakavak talaşından üretilmiş olan aktif karbonların mikro yapılarının incelemelerinde alan taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) kullanılmıştır. FE-SEM ile görüntülemeye geçmeden önce 5 nm kalınlık ile numune yüzeyleri İridyumla kaplanmıştır. Kaplama işlemi Şekil 4.4'de gösterilen LEICA EM ACE600 cihazı ile yapılmıştır. Şekil 4.5'de FE-SEM cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.4. LEICA EM ACE600 model kaplama cihazı (Özdemir, 2023)

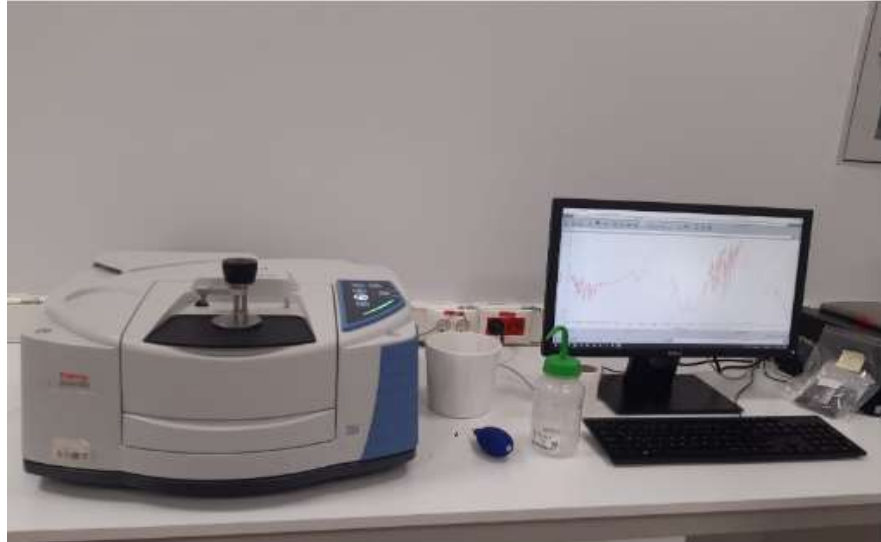
Mikro yapının incelenmesi ZEISS GeminiSEM 500 model cihaz ile yapılmıştır.



Şekil 4.5. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskop cihazı (Özdemir, 2023)

#### 4.2.3. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi ( FT-IR )

Aktif karbonların yapısında bulunan fonksiyonel grupların tespiti Şekil 4.6'da gösterilen Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) cihazı ile incelenmiştir.



Şekil 4.6. Thermo scientific/nicolet IS 20 FT-IR cihazı (Özdemir, 2023)

#### 4.2.4. Yoğunluk ölçümleri

Aktif karbonların yoğunluklarını ölçmek için  $\pm 0,001$  g hassasiyete sahip olan Micromeritics Accupyc II 1340 model gaz piknometre ünite sistemi kullanılmıştır. Şekil 4.7’de yoğunluk ölçüm cihazı gösterilmiştir.



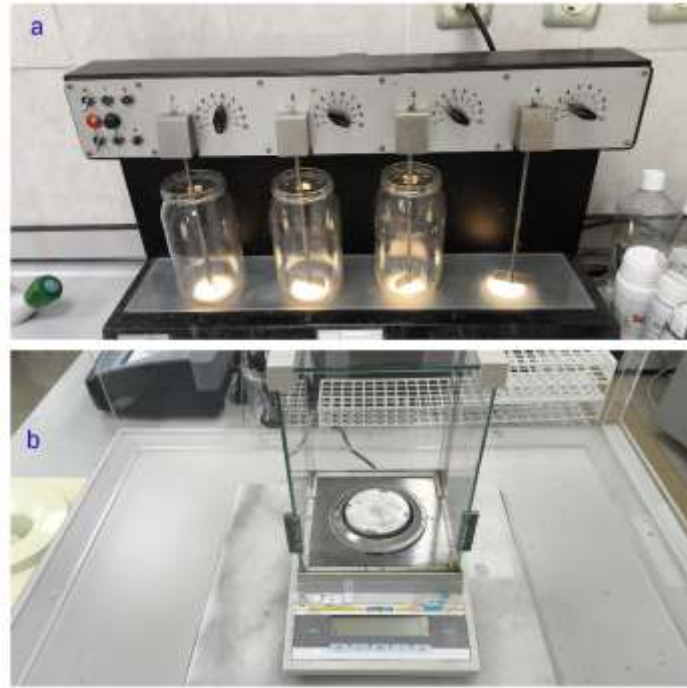
Şekil 4.7. Gaz piknometre ünite sistemi (Özdemir, 2023)

#### 4.2.5. Adsorpsiyon deney işlemleri

Atıksu Arıtma Tesisi girişinden alınan numunler 500 ml olacak şekilde şişelere konulmuştur. 500 ml suya 0,01 gram aktif karbon katılmıştır. Aktif karbonların iyi bir şekilde karışması için 2 dakikada 150 devirli, 20 dakika boyunca 40 devirde karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi bittikten sonra 60 dakika bekletilerek bir şırınga yardımı

ile üst kısımlardan su alınmıştır. Alınmış olan bu sular daha sonra filtre kağıtından geçirilerek laboratuvar testlerine hazır hale gelmiştir. Her bir numune için ph, elektrik iletkenliği, renk, bulanıklık, KOİ değerlerine bakılmıştır.

Sartorius Analitik terazi BP 210 S. Max 210mg, okunabilirlik +/- 0,1mg, dahili kalibrasyon ve tartım plakası çapı 70mm özelliklerine sahip ürün ile aktif karbon tartma işlemi yapılmıştır. Karıştırma işlemleri ise PWT marka 4 ayrı pozisyonlu deviri ayarlanabilen cihaz ile yapılmıştır. Şekil 4.8’de jar cihazı ve hassas terazi gösterilmiştir.



Şekil 4.8. a) Jar cihazı b) Hassas terazi

## 5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Farklı üretim yöntemleri ile üretilmiş olan aktif karbonların öncelikli olarak BET yüzey analizleri, FE-SEM görüntüleri, FT-IR analizleri ve yoğunluk analizleri yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalardan sonra ise adsorpsiyon deneyleri yapılmıştır ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

### 5.1. BET Analizi Deney Sonuçları

Aktif karbonların BET yüzey alanları, gözeneklilikleri için deneyler yapılmış ve incelenmiştir. Tablo 5.1’de BET yüzey analizi sonuçları gösterilmiştir.

**Tablo 5.1.** BET analizi deney sonuçları

	Yüzey Alanı m <sup>2</sup> /g	V <sub>micro</sub> (cm <sup>3</sup> /g)	V <sub>mezo</sub> (cm <sup>3</sup> /g)	V <sub>total</sub> (cm <sup>3</sup> /g)	D <sub>p</sub> (nm)
Hazır Aktif karbon	270	0.175	0.099	0.274	1.679
OA	957	0.415	0.186	0.601	0.592
OT	996	0.431	0.081	0.512	0.496
AKA	400	0.254	0.099	0.342	0.868
AKT	501	0.344	0.034	0.378	0.584

BET yüzey analizleri incelendiğinde yüzey alanı en büyük olan OT olmakla birlikte ikinci olarak da OA numunesinde elde edilmiştir. OT numunesinin mikro gözenek yapısı en yüksek olmasına karşın mezo gözenek sayısı oldukça azdır. Total gözeneğe bakıldığında en yüksek olan OA numunesidir. Buradan da anlaşılacağı üzere mikro gözenek yapısı BET yüzey alanını etkileyen büyük faktördür. Mikro gözenek yapısı ne kadar fazla ise yüzey alanı o kadar büyük olmaktadır (Küçükgül, 2004). Adsorpsiyon işlemi en aktif rolü mikro gözenekler alır (Güneş, 2016). OA, OT, AKA ve AKT numunelerinde toplam gözenek hacminde mikro gözenek boyutunun daha baskın olduğundan dolayı gözeneklilik daha çok iç kısımlarda gerçekleştiği ve mikro gözeneklerin baskın olduğu kabul edilebilir (Valizadeh vd., 2018)

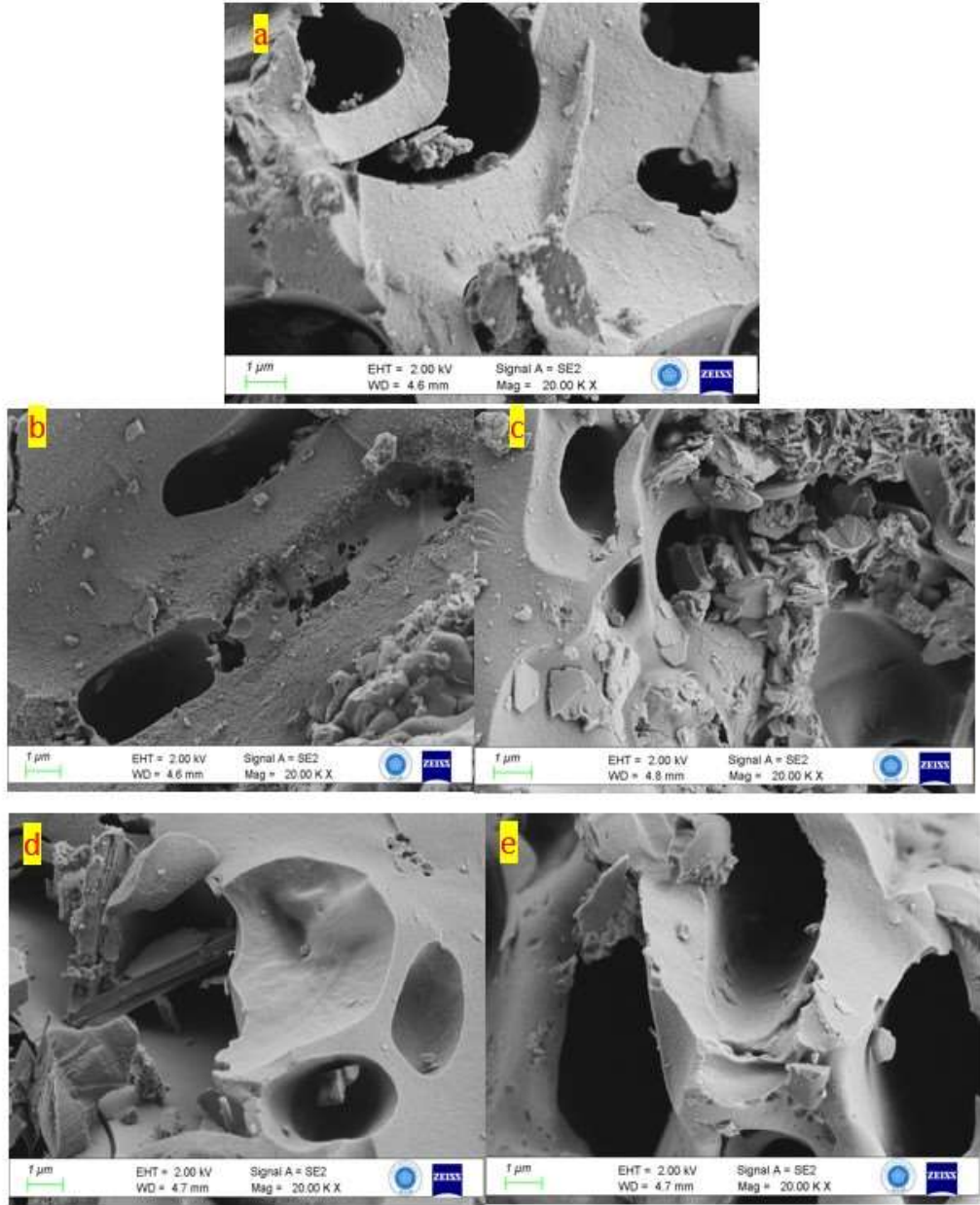
Fosforik asit ve çinkoklorür ile üretilen numuneler incelendiğinde fosfat bağlarının kararsız bir hale gelmesi, buda ikincil bir daralmaya sebebiyet vermektedir. Karakavak talaşından üretilen aktif karbonlarda mikro gözenekliliğin yüksek olması karakavak talaş numunesinin içerisindeki lignin içeriğinin fazla olmasından kaynaklanabilir (El-Bery vd.,

2022). Gözenek hacim analizine göre mikro gözenekler sırasıyla hazır aktif karbon, OA, OT, AKA ve AKT numunelerinde % 63, % 69, % 84, % 74 ve % 91. Genel olarak çinko klorürün mikro ve mezo gözenek yapısının gelişimi için fosforik asit ajanına göre daha etkilidir (Heidarinejad vd., 2020).

OT numunesi, 996 m<sup>2</sup>/g ile en yüksek yüzey alanına sahiptir. Ayrıca, mikro gözenek hacmi (0.431 cm<sup>3</sup>/g) en yüksek olan numune olarak dikkat çekmektedir. Bu, OT'nin adsorpsiyon performansı açısından en iyi numune olduğunu doğrulamaktadır. OA, hem mikro (0.415 cm<sup>3</sup>/g) hem de mezo (0.186 cm<sup>3</sup>/g) gözenek hacimleri arasında dengeli bir dağılım sergilemektedir. Bu, toplam gözenek hacmini (0.601 cm<sup>3</sup>/g) en yüksek yapan numune olmasını sağlamıştır. Dengeli gözenek yapısı, farklı boyutlardaki moleküllerin adsorpsiyonunda avantaj sağlayabilir (Türkyılmaz ve Işınkaralar, 2020). Hazır aktif karbon, hem yüzey alanı (270 m<sup>2</sup>/g) hem de toplam gözenek hacmi (0.274 cm<sup>3</sup>/g) açısından diğer numunelere kıyasla düşük değerlere sahiptir. Buna rağmen mezo gözenek oranı diğer numunelerle rekabet edebilir düzeydedir. AKA ve AKT numuneleri orta düzeyde yüzey alanı ve mikro gözenek hacmi sunmaktadır. Ancak AKA'nın mezo gözenek hacmi (0.099 cm<sup>3</sup>/g) AKT'ye göre daha yüksektir, bu da farklı uygulamalar için avantaj sağlayabilir. AKT ise mikro gözeneklerin daha baskın olduğu bir yapı sergilemektedir. Ortalama gözenek çapı açısından en yüksek değer, hazır aktif karbon (1.679 nm) ile gözlemlenmiştir. Bu, makro gözenekliliğin daha fazla olduğunu gösterirken, diğer numuneler daha çok mikro ve mezo gözeneklere odaklanmaktadır. OT ve OA numuneleri, en küçük gözenek çapına sahip olarak mikro gözeneklere yoğunlaştığını göstermektedir. Yüksek gözenek hacminin ve çoklu gözenek yapısı ne kadar fazla ise adsorpsiyon ( renk, bulanıklık ve KOİ giderimi ) o kadar iyi olmaktadır (Türkyılmaz ve Işınkaralar, 2020)

## 5.2. FE-SEM Görüntüleri

Aktif karbonların FE-SEM görüntüleri elde edilmiş ve incelenmiştir. Şekil 5.1'de hazırlanmış olan numunelerin FE-SEM görüntüleri gösterilmiştir.



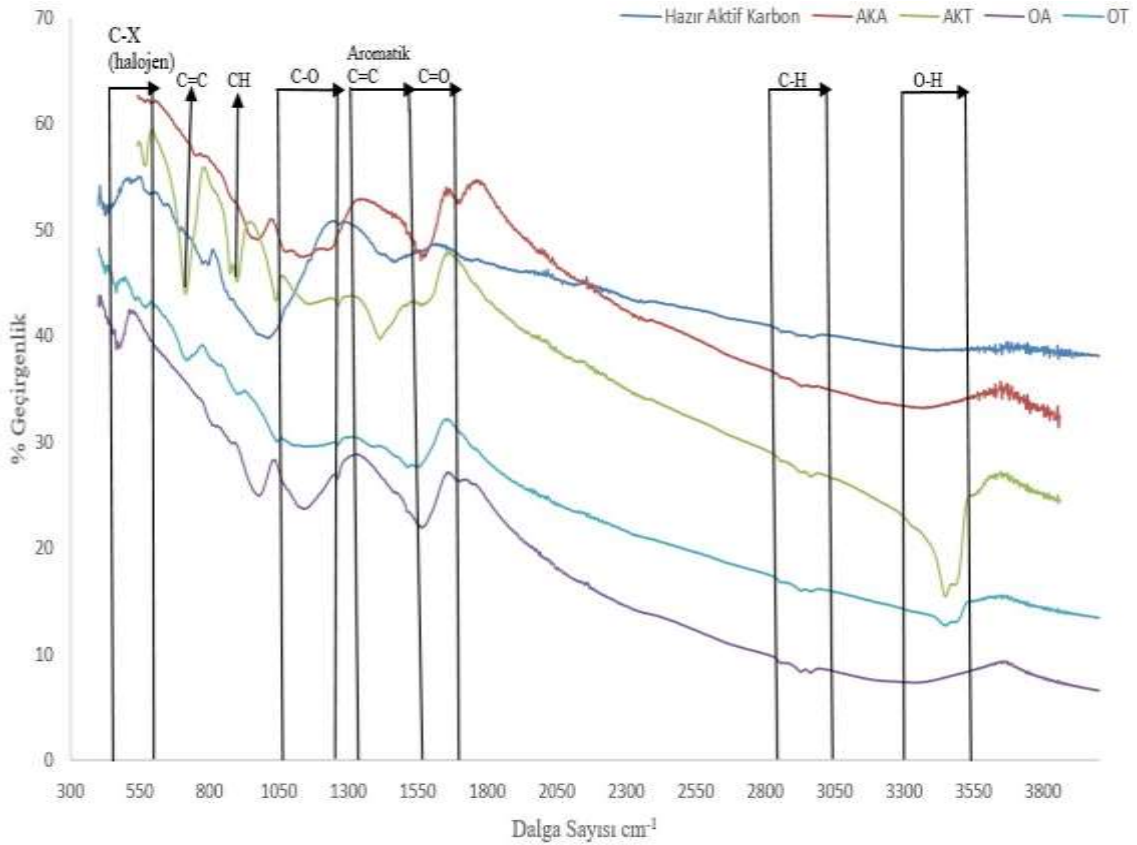
**Şekil 5. 1.** Hazır aktif karbon numunesi **b)** AKA numunesi **c)** AKT numunesi **d)** OA numunesi **e)** OT numunesi FE-SEM görüntüleri

Aktif karbon numunelerinin FE-SEM görüntülerini incelendiğinde numunelerin yüzey görüntüsü bazılarında net bir şekilde gözenekliliği gösterirken bazılarında net bir şekilde macro gözenekler gözlemlenememiştir. Ayrıca görüntüler incelendiğinde elips şeklinde olduğu, bazılarının herhangi bir şekli olmadığı gözlemlenmiştir. Hazır aktif karbon, AKT ve AKA numunelerinin, FE-SEM görüntüsü incelendiğinde dış yüzeyin genel olarak pürüzlü, girinti ve çıkıntılara sahip olduğu, gözeneklerin ise bu girinti çıkıntılara göre az olduğu görülmektedir. Hazır aktif karbon numunesinin gözenek boyutlarının az ve küçük çapta olması FE-SEM görüntüleri, BET analizi ve yoğunluk

analizi ile desteklenmiştir. AKA numnesi incelendiğinde yüzey genişliği heterojen bir yapıdadır. AKT numnesinde dış yüzeyinde düzensiz boşluklar ve büyük küçük şekilsiz gözenekler vardır. BET yüzey analizi incelendiğinde bu numune de micro gözenek sayısının ve BET yüzey alanının oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Buradan, gözenekliliğin mikro boyutlu meydana gelmesinden dolayı gözenekliliğin önemli bir şekilde numunenin iç kısımlarında geliştiğini göstermiştir. OA ve OT numunleri incelendiğinde daha belirgin net bir şekilde gözeneklerin oluştuğunu ve daha homojen bir şekilde dağıldığını söylemek mümkündür. Çinko klorür ile aktive edilen aktif karbonlarda çinko klorür buharlaşmış ve buharlaşmasından dolayıda boşlukların sayısında artış meydana gelmiştir (Shrestha vd., 2019). Ayrıca bu numunelerin BET yüzey alanı ve mikro gözenek yapısı oldukça fazladır. Bu da gözenekliliğin iç kısımda gerçekleşmesi olarak yorumlanabilir (Küçükgül, 2004; Saygılı ve Güzel, 2016). Buradan çıkarılacak sonuç çinko klorürün mikro ve mezo gözenek yapısının gelişimi için fosforik asit ajanına göre daha etkili olduğudur (Ahiduzzaman, 2016; Liou, 2010; Saygılı ve Güzel, 2016; Shrestha vd., 2019).

### **5.3. FT-IR Analizi Sonuçları**

Hazırlanan aktif karbonların kimyasal bileşenlerini tespit etmek için FT-IR analizi yapıp incelenmiştir. Şekil 5.2’de aktif karbonların FT-IR sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 5.2. FT-IR analiz sonuçları

Hazır aktif karbon numunesi incelendiğinde  $450-600\text{ cm}^{-1}$ : C-X (halojen) gerilme titreşimleri halojen bileşikleri (C-Cl veya C-Br) içerebilir (Mahapatra vd., 2012).  $1000-1300\text{ cm}^{-1}$ : C-O gerilme titreşimleri alkol (R-OH), ester (R-COOR') veya eter (R-O-R') gruplarının varlığına işaret edebilir (unitechlink.com, t.y.).  $1450-1600\text{ cm}^{-1}$ : Aromatik C=C gerilme titreşimleri aromatik halkalar (benzen türevleri) içeriyor olabilir (Gurten vd., 2012).  $1600-1700\text{ cm}^{-1}$ : C=O gerilme titreşimleri. karbonil grupları (keton, aldehit, karboksilik asit) içeriyor olabilir.  $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ : C-H gerilme titreşimleri alkan veya alkil gruplarının varlığını gösterebilir (Yagmur vd., 2008).  $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ : O-H gerilme titreşimleri alkol veya su gruplarının varlığını gösterebilir (unitechlink.com, t.y.).

AKA numunesi incelendiğinde  $450-600\text{ cm}^{-1}$ : C-X (halojen) gerilme titreşimleri halojen bileşikleri (C-Cl veya C-Br) içerebilir (Mahapatra vd., 2012).  $1000-1300\text{ cm}^{-1}$ : C-O gerilme titreşimleri alkol (R-OH), ester (R-COOR') veya eter (R-O-R') gruplarının varlığına işaret edebilir (unitechlink.com, t.y.).  $1450-1600\text{ cm}^{-1}$ : Aromatik C=C gerilme titreşimleri aromatik halkalar (benzen türevleri) içeriyor olabilir (Gurten vd., 2012).  $1600-1700\text{ cm}^{-1}$ : C=O gerilme titreşimleri. karbonil grupları (keton, aldehit, karboksilik asit) içeriyor olabilir.  $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ : C-H gerilme titreşimleri alkan veya alkil

gruplarının varlığını gösterebilir (Yagmur vd., 2008). 3300-3500  $\text{cm}^{-1}$ : O-H gerilme titreşimleri alkol veya su gruplarının varlığını gösterebilir (unitechlink.com, t.y.).

AKT numunesi 450-600  $\text{cm}^{-1}$ : C-X (halojen) gerilme titreşimleri halojen bileşikleri (C-Cl veya C-Br) içerebilir (Mahapatra vd., 2012). 1000-1300  $\text{cm}^{-1}$ : C-O gerilme titreşimleri alkol (R-OH), ester (R-COOR') veya eter (R-O-R') gruplarının varlığına işaret edebilir (unitechlink.com, t.y.). 1450-1600  $\text{cm}^{-1}$ : Aromatik C=C gerilme titreşimleri aromatik halkalar (benzen türevleri) içeriyor olabilir (Gurten vd., 2012). 1600-1700  $\text{cm}^{-1}$ : C=O gerilme titreşimleri. karbonil grupları (keton, aldehit, karboksilik asit) içeriyor olabilir. 2800-3000  $\text{cm}^{-1}$ : C-H gerilme titreşimleri alkan veya alkil gruplarının varlığını gösterebilir (Yagmur vd., 2008). 3300-3500  $\text{cm}^{-1}$ : O-H gerilme titreşimleri alkol veya su gruplarının varlığını gösterebilir (unitechlink.com, t.y.).

OA numunesi incelendiğinde 450-600  $\text{cm}^{-1}$ : C-X (halojen) gerilme titreşimleri halojen bileşikleri (C-Cl veya C-Br) içerebilir (Mahapatra vd., 2012). 1000-1300  $\text{cm}^{-1}$ : C-O gerilme titreşimleri alkol (R-OH), ester (R-COOR') veya eter (R-O-R') gruplarının varlığına işaret edebilir (unitechlink.com, t.y.). 1450-1600  $\text{cm}^{-1}$ : Aromatik C=C gerilme titreşimleri aromatik halkalar (benzen türevleri) içeriyor olabilir (Gurten vd., 2012). 1600-1700  $\text{cm}^{-1}$ : C=O gerilme titreşimleri. karbonil grupları (keton, aldehit, karboksilik asit) içeriyor olabilir. 2800-3000  $\text{cm}^{-1}$ : C-H gerilme titreşimleri alkan veya alkil gruplarının varlığını gösterebilir (Yagmur vd., 2008). 3300-3500  $\text{cm}^{-1}$ : O-H gerilme titreşimleri alkol veya su gruplarının varlığını gösterebilir (unitechlink.com, t.y.).

OT numunesi incelendiğinde 450-600  $\text{cm}^{-1}$ : C-X (halojen) gerilme titreşimleri halojen bileşikleri (C-Cl veya C-Br) içerebilir (Mahapatra vd., 2012). 1000-1300  $\text{cm}^{-1}$ : C-O gerilme titreşimleri alkol (R-OH), ester (R-COOR') veya eter (R-O-R') gruplarının varlığına işaret edebilir (unitechlink.com, t.y.). 1450-1600  $\text{cm}^{-1}$ : Aromatik C=C gerilme titreşimleri aromatik halkalar (benzen türevleri) içeriyor olabilir (Gurten vd., 2012). 1600-1700  $\text{cm}^{-1}$ : C=O gerilme titreşimleri. karbonil grupları (keton, aldehit, karboksilik asit) içeriyor olabilir. 2800-3000  $\text{cm}^{-1}$ : C-H gerilme titreşimleri alkan veya alkil gruplarının varlığını gösterebilir (Yagmur vd., 2008). 3300-3500  $\text{cm}^{-1}$ : O-H gerilme titreşimleri alkol veya su gruplarının varlığını gösterebilir (unitechlink.com, t.y.).

Her bir grafikte hidroksil, alifatik ve aromatik hidrokarbonlar, karbonil grupları, esterler ve eterler gibi karakteristik fonksiyonel gruplar gözlemlenmektedir. İnorganik bileşiklere dair belirgin pikler bu spektrumlarda bulunmamaktadır. Aktif karbonun içerisinde bulunan C=C, OH ve C-O bağlarının varlığı renk, bulanıklık ve KOİ değerlerinin

düşmesine olanak sağlamıştır (Eletta vd., 2018; Mohammad Razi vd., 2018; Zhang vd., 2025).

#### 5.4. Yoğunluk Analizleri

Hazırlamış olduğumuz toplam 5 farklı aktif karbonun yoğunluk analizleri yapılmış ve yorumlanmıştır. Tablo 5.2’de yoğunluk analizleri gösterilmiştir.

**Tablo 5 2.** Yoğunluk analizi sonuçları

Numune Adı	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
HAZIR AKTİF KARBON	2,14
AKT	1,8249
AKA	1,6538
OT	1,1248
OA	1,3765

Yoğunluk deney verilerine göre en düşük yoğunluk sırasıyla OT, OA, AKA, AKT ve hazır aktif karbon olarak sıralayabiliriz. Yoğunluk verilerinin düşük olması hacim ile alakalıdır. Gözeneklilik oranı ne kadar fazla ise hacim de o kadar yüksek ve yoğunlukta o kadar düşük olacaktır (Jiang vd., 2021). Buradan da gözenekliliğin en fazla olduğu numune OT numunesidir çıkarımı yapılabilir.

#### 5.5. Adsorpsiyon Deneyi Sonuçları

Aktif karbon numunelerimiz ile adsorpsiyon deneyleri yapılarak incelemeleri yapılmıştır. Tablo 5.3’de adsorpsiyon deneyi sonuçları gösterilmiştir.

**Tablo 5.3.** Adsorpsiyon deneyi sonuçları

Numune Adı	p H	EC <sub>m</sub>	KOİ	BULANIKLIK	RENK (RES)
	P H okuma	EC okuma μS/cm	mg/L	NTU	620 nm m <sup>-1</sup>
NUMUNE	7,38	2893	725	105	1,09

HAZIR AKTİF KARBON	7,54	2885	597	46,2	0,96
AKT	7,67	2914	682	45,5	1,42
AKA	7,64	2901	639	55,2	1,03
OT	7,64	2893	587	40,6	0,95
OA	7,64	2928	595	54,7	1,03

Yapılan çalışmada 1 hamsu olmak üzere 5 farklı aktif karbon ile atıksulardan KOİ, renk ve bulanıklık gideriminin yanı sıra aktif karbonların atıksuların ph, elektrik iletkenliğine etkisi araştırılmıştır. KOİ gideriminde en yüksek verim % 19 ile OT olan aktif karbonda olmuştur. Bulanıklık gideriminde ise en yüksek verim % 61 OT de gerçekleşmiştir. Renk ise en yüksek verim % 13 ile OT olan aktif karbonda gerçekleşmiştir. Ph ve elektrik iletkenliğinde kayda değer bir değişiklik olmamıştır. Daha önceki yapılan çalışmalarda fosforik asit ile aktivasyonu yapılan aktif karbonlarda fosfat elementinin görüldüğü rapor edilmiştir (Ergün ve Bülbül, 2022; Vázquez-Santos vd., 2012). OA –OT ve AKT-AKA numunlerinin adsorpsiyonu karşılaştırıldığında kendi içlerinde farklılıkların olması AKA ve OA numunlerinde fosfat türlerinin gözenekleri tıkanmasından kaynaklı olabileceği ön görülmüştür (Valizadeh vd., 2018). OT numunesinde en iyi adsorpsiyon yapmasının nedeni iyi gelişmiş mikro gözeneklilik ile alakalıdır (Shrestha vd., 2019). Ayrıca iyi adsorpsiyon yeteneğini etkileyen başka etmen yapısında bulunan selüloz içeriği ile de açıklanabilir (Astuti vd., 2024). OT numunesi ayrıca yoğunluk olarak en düşük olması, BET yüzey alanının en yüksek olması ve gözenekliliğinin en yüksek olması ile adsorpsiyon kapasitesi ile arasındaki bağı göstermiştir.

Günümüzde atıksuların arıtımında sadece aktif karbon kullanılmamaktadır. Biyolojik ve kimyasal arıtmadan sonra aktif karbonların kullanılması daha uygun olmaktadır. Evsel nitelikli atıksuların alıcı ortama deşarj standartlarına göre KOİ değeri 180 mg/L, renk ve bulanıklık ile ilgili değer doğal olarak belirtilmiştir. Ancak alınan hammadde numunelerine göre farklı atıksuların ( sanayi, hastane vb. ) karışık karışmadığı bilinmemektedir. Karışması durumunda bu referans değerleri değişmektedir.

Bu değerlerin ( KOİ, renk, bulanıklık ) istenilen referans değerlerine düşmesi için kum ve yağ tutucular, havalandırılmalı kum tutucular, havalandırma tankları, köpük alıcılar ve fosfor ünüteleri vb ekstra yapılar ile birlikte arıtma işlemine tabi olması

gerekmektedir. Üretilmiş olan aktif karbonlar her ne kadar referans değerlere ulaşamamış olursa da arıtmaya yardımcı ekstra yapılar ile kullanıldığında daha fazla KOİ, renk ve bulanıklık giderimine imkân sağlayacaktır. Bu çalışmanın amacı katma değeri yüksek ürünler elde etmek ve bu elde edilen ürünleri piyasada hazır olanlar ile kıyaslamaktır. Bu kıyaslama yapıldığında üretilmiş olduğumuz aktif karbonların, ticari aktif karbona kıyasla daha fazla katma değer sağladığı ve daha iyi adsorpsiyon yaptığı görülmüştür.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1 Sonuçlar

Bu çalışmada farklı yöntemler ile üretilen aktif karbon numunelerinin yüzey alanı, gözenek yapısı, yoğunluk, morfolojik özellikleri ve atıksu giderim performansları detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan incelemelerde aşağıda belirtilen sonuçlara varılmıştır.

- En geniş yüzey alanına sahip numune OT olurken, ikinci sırada OA numunesi gelmiştir. Mikro gözenek yapısının yüzey alanının büyüklüğünü belirleyen temel faktör olduğu görülmüştür. Mikro gözenek oranları açısından OT, OA, AKA, AKT ve hazır aktif karbon olarak sıralayabiliriz.
- Mikro gözeneklerin yüzey alanı üzerindeki etkisi, toplam gözenekliliğin daha çok numunelerin iç yapısında gerçekleştiğini göstermektedir.
- Çinko klorür, fosforik aside kıyasla daha etkili bir aktivasyon ajanı olarak mikro ve mezo gözenek yapısının gelişimini desteklemiş ve daha homojen bir gözenek dağılımı sağlamıştır.
- FE-SEM görüntü analizlerinde bazı numunelerde gözeneklilik net bir şekilde gözlemlenirken, bazılarında makro gözeneklerin varlığı belirgin bir şekilde tespit edilememiştir. Özellikle AKT numunesinde makro gözeneklerin eksikliği, mikro gözeneklerin iç kısımda daha yoğun şekilde oluştuğunu ortaya koymuştur. Numunelerin dış yüzeyleri genelde pürüzlü ve girintili-çıkıntılı bir yapı sergilemiştir. Bu yapı, yüksek mikro gözeneklilik ile yüzey alanı analizleriyle desteklenmiştir.
- Yoğunluk analizlerinde, OT en düşük yoğunluğa sahip olurken sırasıyla OA, AKA, AKT ve hazır aktif karbon numune takip etmiştir. Gözeneklilik oranı ile yoğunluk arasında ters bir ilişki olduğu; gözeneklilik arttıkça yoğunluğun azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla en yüksek gözeneklilik oranının OT numunesinde olduğu sonucuna varılmıştır.
- OT numenesi diğerlerine kıyasla atıksulardan KOİ, bulanıklık ve renk gideriminde en yüksek performansı göstermiştir. KOİ ( % 19 ), bulanıklık ( % 61

) ve renk ( % 13 ) olarak tespit edilmiştir. Elektrik iletkenliği ve Ph parametrelerinde aktif karbon numunelerinin anlamlı bir değişiklik yaratmadığı görülmüştür.

- Fosforik ait aktivasyonu ile üretilen numunelerde, fosfat bağlarının kararsız hale gelmesi daha az gözenekli ve yoğun yapıların oluşturduğu, fosfat türlerinin gözenekleri tıkadığı ve adsorpsiyon kapasitesini düşürdüğü bu çalışmada gözlemlenmiştir.
- OA –OT ve AKT-AKA numunelerinin adsorpsiyonu karşılaştırıldığında kendi içlerinde farklılıkların olması AKA ve OA numunelerinde fosfat türlerinin gözenekleri tıkasından kaynaklı olabileceği ön görülmüştür. Buna karşın, bu çalışmada çinko klorürün mikro ve mezo gözenek yapısının gelişmesinde daha etkili olduğu ve bu nedenle daha etkili bir adsorpsiyon yeteneği sergilediği tespit edilmiştir.
- OT numunesinin yüksek adsorpsiyon kapasitesi, gelişmiş mikro gözenek yapısı ve içerdiği selülozun pozitif etkisiyle ilişkilendirilmiştir. Mikro gözeneklerin yüksek orada baskın olması, numunelerin iç kısımlarında gelişmiş gözeneklilik yapılarının adsorpsiyon performansını olumlu etkilediğini göstermiştir.
- Adsorpsiyon işleminde en aktif rolü mikro gözenekler aldığından dolayı adsorpsiyon en fazla mikro gözenek yapısı olan OT numunesinde olmuştur.
- OT numunesinin hidrofobikliği diğer numunelere göre biraz fazla olması adsorpsiyon işleminin daha verimli olması ile daha önceki yapılan çalışmalar ışığında açıklanabilir. Ayrıca iyi adsorpsiyon yeteneğini etkileyen başka etmen yapısında bulunan selüloz içeriği ile de açıklanabilir.

Bu çalışmanın sonuçları çinko klorür ile aktivasyonu yapılan OT numunesi, fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından diğer numunelere kıyasla üstünlük sağlamıştır. Yüksek mikro gözeneklilik geniş yüzey alanı, düşük yoğunluk ve etkili adsorpsiyon kapasitesi OT ‘yi hem atıksu arıtımda hemde endüstriyel uygulamalarda öne çıkan bir malzeme haline gelmiştir. Çinko klorürün aktif karbon üretimdeki etkinliği bir kez daha doğrulanmış ve fosforik aside kıyasla üstün olduğu bu çalışmada ortaya konulmuştur.

Bu bulgulardan ışığında; atık kâğıttan ve odun talaşından üretilen aktif karbonların piyasadan alınmış Hindistan cevizinden üretilmiş aktif karbona kıyasla KOİ, renk, bulanıklık gideriminde daha kullanılabilir olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca atık ürünlerin geri dönüştürülmesi ve katma değeri daha yüksek ürünler elde edilmesini sağlamıştır. Aktif karbon üretimi ve uygulamaları üzerine yapılan çalışmalarda çinko klorür gibi etkin ajanların kullanımının önemi ortaya çıkmıştır. Gelecekte yapılacak araştırmalarda farklı organik ve inorganik aktivasyon ajanlarının etkileri daha geniş bir perspektifte değerlendirilebilir.

## 6.2 Öneriler

Bu tez çalışmasında kullanılan aktif karbonun dozajı 500 ml suya 0,01 gram olarak kullanılmıştır. Katı partiküllerin ve kolloidal yapılarını topaklaştırıp ve çökmelerini sağlayan koagülantlar kullanılmamıştır. Aktif karbon dozajından sonra 2 dakikada 150 devirli, 20 dakika boyunca 40 devirde karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi bittikten sonra 60 dakika beklenilmiştir. Yukarıda bahsedilenler dışında aktif karbon dozajı, koagülant kullanıp kullanılmaması, karıştırma süreleri, karıştırma devirleri, sıcaklık ve bekleme süreleri gibi adsorpsiyona yardımcı olacak farklı değişkenler eklenerek adsorpsiyon işlemi genişletilebilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Adinata, Donni, Wan Mohd Ashri Wan Daud, ve Mohd Kheireddine Aroua. 2007. "Preparation and characterization of activated carbon from palm shell by chemical activation with  $K_2CO_3$ ". *Bioresource Technology* 98(1): 145-49.
- Ahiduzzaman, Mohamed. 2016. "Evaluation of Characteristics of Activated Carbon from Rice Husk Impregnated with Zinc Chloride and Phosphoric Acid". *American Journal of Physical Chemistry* 5(5).
- Ahmad, A. A., ve B. H. Hameed. 2009. "Reduction of COD and color of dyeing effluent from a cotton textile mill by adsorption onto bamboo-based activated carbon". *Journal of Hazardous Materials* 172(2-3): 1538-43.
- Ahmad, A. A., ve B. H. Hameed. 2010. "Effect of preparation conditions of activated carbon from bamboo waste for real textile wastewater". *Journal of Hazardous Materials* 173(1-3).
- Ahmad Md Noor; Mohd Asri Mohd Naw; HPSAbdul Khalid. 2009. "Toward Production of the Micro- and Mesoporous Activated Carbon from Oil Palm Shell by Chemical Activation Process with  $ZnCl_2$ ,  $H_3PO_4$  and  $KOH$  under Nitrogen and Carbon Dioxide Condition". *Engineering Our Future: Are We up to the Challenge*: 27-30.
- Ahmad, Mohd Azmier, ve Nazira Khabibor Rahman. 2011. "Equilibrium, kinetics and thermodynamic of Remazol Brilliant Orange 3R dye adsorption on coffee husk-based activated carbon". *Chemical Engineering Journal* 170(1).
- Ahmedpour, Ali, ve Duong Do. 1996. "The Preparation of Active Carbons from Coal by Chemical and Physical Activation." : 471-79.
- Akgül, Seda TÖZÜM, Şehnaz Şule Kaplan Bekaroğlu, ve Nevzat Özgü Yiğit. 2019. "Adsorpsiyon Ve İyon Değişimi Prosesleriyle İçme Sularından Doğal Organik Madde Giderimi". *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*.
- Aksu, Zümriye, ve Jülide Yener. 2001. "A comparative adsorption/biosorption study of mono-chlorinated phenols onto various sorbents". *Waste Management* 21(8).
- Alçın, Erik Nazan. 2022. "Kömür Özelliklerinin Temiz Kömür Teknolojilerine (Gazlaştırma, Sıvılaştırma, Karbon Elyaf Ve Kok Üretimi) Etkisi: Derleme". *UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*: 22-56.
- Angin, Dilek. 2014. "Production and characterization of activated carbon from sour cherry stones by zinc chloride". *Fuel* 115.

- Arpacı, Emreçan, Sami İmamoğlu, ve Murat Ertaş. 2023. “Kestane kabuğundan aktif karbon üretimi: sıcaklık ve fosforik asit etkisi”. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi* 24.
- Aslan, Sibel. 2021. “Çörek Otu Posasının Aktif Karbon Üretiminde Değerlendirilmesi”. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 33(1).
- Aslı Özge AVCI. 2008. “Kayısı çekirdeğinden üretilen aktif karbon ile sulu çözeltilerden krom (VI) giderimi”. Yıldız Teknik Üniversitesi ,Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Astuti, Widi, Triastuti Sulistyaningsih, Dhidik Prastiyanto, Rusiyanto, Lanjar, Fatma Indah Riayanti, Anis Wiji Astuti, vd. 2024. “Influence of lignocellulosic composition in biomass waste on the microstructure and dye adsorption characteristics of microwave-assisted ZnCl<sub>2</sub> activated carbon”. *Biomass Conversion and Biorefinery* 14(14).
- Aşma, Aynur, Elif Yaman, ve Sinan Temel. 2023. “Biyokütleden Gözenekli Karbonlu Malzeme Üretimi: Biyokütle Tipi Ve Sıcaklığın Fizikokimyasal Özelliklere Etkisi”. *Konya Journal of Engineering Sciences* 11(1).
- Aygün, Ayşegül. 2002. “Yerli doğal hammaddelerden aktif karbon üretimi ve adsorpsiyon özelliklerinin incelenmesi”. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Azabache Liza, Yrwin F., Karla M. Santillán Gutierrez, Ronald F. Rodriguez Espinoza, Adolfo E. Guerrero Escobedo, Anita R. Mendiola Céspedes, Roydichan Olano Arévalo, ve Teresa Vela Vásquez. 2022. “Removal of Color and Turbidity in Runoff Water using Coconut (Cocos Nucifera) Endocarp Activated Carbon”. *Chemical Engineering Transactions* 93.
- Balçık, Eda Ülkeryıldız, Mehmet Torun, ve Hilal Şahin Nadeem. 2020. “Gıda Atıklarından Aktif Karbon Üretimi ve Aktif Karbonun Gıda Endüstrisinde Uygulamaları”. *Gıda* 45: 217-29.
- Barakat, Nasser, Albadrawy Hamad, Ali Bastaweesy, ve Rasha Hefny. 2023. “Effective Decolorization and Turbidity Removal of Canal Water using Activated Carbon Prepared from Local Agricultural Wastes”. *Egyptian Journal of Chemistry* 0(0).
- Batmaz, Huriye. 2022. “Bitkisel Atıklardan Kimyasal Aktivasyon ile Aktif Karbon Üretimi”. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

- Bedia, Jorge, Manuel Peñas-Garzón, Almudena Gómez-Avilés, Juan J. Rodriguez, ve Carolina Belver. 2020. "Review on Activated Carbons by Chemical Activation with FeCl<sub>3</sub>". *J. Carbon Res* 6(2).
- Berg, John C. 1998. "Surfactant Science and Technology, D. Myers, VCH Publishers, Inc". *Newyork* 67(5): 1-68.
- Beton, İrem. 2011. "Zeytin Çekirdeğinden Üretilen Aktif Karbona CO<sub>2</sub> Adsorpsiyonun İncelenmesi". *İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Beyan, Surafel Mustefa, S. Venkatesa Prabhu, T. Tsegaye Sissay, ve A. Abraham Getahun. 2021. "Sugarcane bagasse based activated carbon preparation and its adsorption efficacy on removal of BOD and COD from textile effluents: RSM based modeling, optimization and kinetic aspects". *Bioresource Technology Reports* 14: 100664.
- Beyhan, Mehmet. 2003. "Atık çamurlar ve doğal malzemeler ile sulardan florür iyonu gideriminin araştırılması". *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*.
- Bhatnagar, Amit, William Hogland, Marcia Marques, ve Mika Sillanpää. 2013. "An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications". *Chemical Engineering Journal* 219: 499-511.
- Bjelopavlic, Mick, Gayle Newcombe, ve Rob Hayes. 1999. "Adsorption of NOM onto activated carbon: Effect of surface charge, ionic strength, and pore volume distribution". *Journal of Colloid and Interface Science* 210(2).
- Bolgaz, Mehmet Tamer. 2008. "Pamuk sapından iyi nitelikli aktif karbon üretim şartlarının belirlenmesi". *Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Bouchelta, Chafia, Mohamed Salah Medjram, Odile Bertrand, ve Jean Pierre Bellat. 2008. "Preparation and characterization of activated carbon from date stones by physical activation with steam". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 82(1).
- Bozbeyoğlu, Pınar. 2020. "Karadeniz bölgesinde yetişen mısırların (*Zea mays* L.) koçanından aktif karbon üretimi, karakterizasyonu ve atık sulardan çeşitli kirleticilerin uzaklaştırılmasında kullanımının incelenmesi". *Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*.
- Brunauer, Stephen, P. H. Emmett, ve Edward Teller. 1938. "Adsorption of Gases in Multimolecular Layers". *Journal of the American Chemical Society* 60(2).

- Bülbül, Şaban, ve Halime Ergün. 2024. "Investigation of the usability of activated carbon as a filling material in nitrile butadiene rubber/natural rubber components and modeling by regression analysis". *Journal of Elastomers and Plastics* 56(1).
- Campinas, Margarida, Catarina Silva, Rui M.C. Viegas, Rosário Coelho, Helena Lucas, ve Maria João Rosa. 2021. "To what extent may pharmaceuticals and pesticides be removed by PAC conventional addition to low-turbidity surface waters and what are the potential bottlenecks?" *Journal of Water Process Engineering* 40: 101833.
- Campos, Natália F., Giovanna A.J.C. Guedes, Leticia P.S. Oliveira, Brígida M.V. Gama, Deivson C.S. Sales, Joan M. Rodríguez-Díaz, Celmy M.B.M. Barbosa, ve Marta M.M.B. Duarte. 2020. "Competitive adsorption between Cu<sup>2+</sup> and Ni<sup>2+</sup> on corn cob activated carbon and the difference of thermal effects on mono and bicomponent systems". *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8(5).
- Chairunnisa, Frantisek Miksik, Takahiko Miyazaki, Kyaw Thu, Jin Miyawaki, Koji Nakabayashi, Agung Tri Wijayanta, ve Fitria Rahmawati. 2021. "Development of biomass based-activated carbon for adsorption dehumidification". *Energy Reports* 7.
- Chaney, N. K., Arthur B. Ray, ve Ancel St John. 1923. "The Properties of Activated Carbon Which Determine Its Industrial Applications". *Industrial and Engineering Chemistry* 15(12): 1244.
- Cheng, Wei, Seyed A. Dastgheib, ve Tanju Karanfil. 2005. "Adsorption of dissolved natural organic matter by modified activated carbons". *Water Research* 39(11): 2281-90.
- Cuerda-Correa, Eduardo M., Joaquín R. Domínguez-Vargas, Francisco J. Olivares-Marín, ve Jesús Beltrán de Heredia. 2010. "On the use of carbon blacks as potential low-cost adsorbents for the removal of non-steroidal anti-inflammatory drugs from river water". *Journal of Hazardous Materials* 177(1-3).
- Czernik, S., ve A. V. Bridgwater. 2004. "Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil". *Energy and Fuels*: 590-98.
- Daful, Asfaw G., ve Meegalla R Chandraratne. 2020. "Biochar Production From Biomass Waste-Derived Material". İçinde *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials: Volume 1-5*,.
- Daniel, Likius Shipwiisho, Ateeq Rahman, Mirjam Ndakola Hamushembe, Paulus Kapolo, Veikko Uahengo, ve Sreekantha Babu Jonnalagadda. 2023. "The production of activated carbon from *Acacia erioloba* seedpods via phosphoric acid

- activation method for the removal of methylene blue from water". *Bioresource Technology Reports* 23.
- Dastgheib, Seyed A., Tanju Karanfil, ve Wei Cheng. 2004. "Tailoring activated carbons for enhanced removal of natural organic matter from natural waters". *Carbon* 42(3): 547-57.
- Demiral, Hakan, ve Gül Gündüzoğlu. 2010. "Removal of nitrate from aqueous solutions by activated carbon prepared from sugar beet bagasse". *Bioresource Technology* 101(6).
- Demir, Ebru, ve Hüseyin Yalçın. 2014. "Adsorbentler: Sınıflandırma, Özellikler, Kullanım ve Öngörüler". *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi* 7(2).
- Demirel Selahattin. 2001. "Kalsiyum Aljinat Bilyeleri İle Bakırın Adsorpsiyonu". *Atatürk üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi*.
- Deng, Hui, Guoxue Li, Hongbing Yang, Jiping Tang, ve Jiangyun Tang. 2010. "Preparation of activated carbons from cotton stalk by microwave assisted KOH and K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> activation". *Chemical Engineering Journal* 163(3): 373-81. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894710007242> (30 Nisan 2025).
- Devi, Rani, Vijender Singh, ve Ashok Kumar. 2008. "COD and BOD reduction from coffee processing wastewater using Avacado peel carbon". *Bioresource Technology* 99(6): 1853-60.
- Donat, R., A. Akdogan, E. Erdem, ve H. Cetisli. 2005. "Thermodynamics of Pb<sup>2+</sup> and Ni<sup>2+</sup> adsorption onto natural bentonite from aqueous solutions". *Journal of Colloid and Interface Science* 286(1).
- Dumanlı Ayşe. 2011. *Alunit Cevheri Üzerinde Bazı Ağır Metal İyonlarının Adsorpsiyon Davranışlarının İncelenmesi Ve Modellenmesi*.
- El-Bery, Haitham M., Moushira Saleh, Reem A. El-Gendy, Mahmoud R. Saleh, ve Safinaz M. Thabet. 2022. "High adsorption capacity of phenol and methylene blue using activated carbon derived from lignocellulosic agriculture wastes". *Scientific Reports* 12(1).
- Elbinsoy, Sezer. 2016. *Yüksek Kükürt İçeren Kütahya-Gediz Yöresi Kömürlerinden Aktif Karbon Üretilmesi ve Özelliklerinin Belirlenmesi*.
- El-Dars, F M S E, M H M Bakr, ve Adel M E Gabre. 2013. 1 *Journal of Environmental Treatment Techniques Reduction of COD in Resin Production Wastewater Using*

- Three Types of Activated Carbon*. journal of environmental treatment techniques (13 Mayıs 2025).
- Eletta, O.A.A., S.I. Mustapha, O.A. Ajayi, ve A.T. Ahmed. 2018. "Optimization of dye removal from textile wastewater using activated carbon from sawdust". *Nigerian Journal of Technological Development* 15(1).
- Erdoğan, Fatma Oğuz, ve Turkan Kopaç. 2020. "Zonguldak-Karadon kömüründen elde edilen aktif karbonların oda sıcaklığında aseton adsorpsiyon özelliklerinin incelenmesi". *Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Dergisi* 35: 2211-24.
- Ergün, Mehmet Emin, ve Saban Bülbül. 2022. "Production and characterization of activated carbon from Black Poplar (*Populus Nigra*) wood waste with different chemical activation methods". *International Advanced Researches and Engineering Journal* 6.
- Ergün, Mehmet Emin, Abdullah İstek, İsmail Özlüsoylu, Filiz Koyuncu, ve Şaban Bülbül. 2024. "Low formaldehyde-emission particleboards with the addition of Scots pine wood waste derived activated carbon". *Wood Material Science and Engineering*.
- Fazlzadeh, Mehdi, Rasoul Khosravi, ve Ahmad Zarei. 2017. "Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Peganum harmala* seed extract, and loaded on *Peganum harmala* seed powdered activated carbon as new adsorbent for removal of Cr(VI) from aqueous solution". *Ecological Engineering* 103.
- Gerçek, Buse. 2015. "Toluenin Çeşitli Ticari Aktif Karbon Filtrelerle Adsorpsiyonunun İncelenmesi". *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Gomez-Serrano, V., E.M Cuerda-Correa, M.C Fernandez-Gonzalez, M.F Alexandre-Franco, ve Macias-Garcia. 2005. "Preparation of activated carbons from chestnut wood by phosphoric acid-chemical activation study of microporosity and fractal dimension". *Study of microporosity and fractal dimension*.: 846-53.
- Gregg, S. J., ve K. S. W. Sing. 1982. "Adsorption, Surface Area and Porosity". *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie* 86(10).
- Gupta, Shubham A., Yamy Vishesh, N. Sarvshrestha, Adarsh S. Bhardwaj, Prince A. Kumar, Niraj S. Topare, Sunita Raut-Jadhav, Shantini A. Bokil, ve Anish Khan. 2022. "Adsorption isotherm studies of Methylene blue using activated carbon of waste fruit peel as an adsorbent". *Materials Today: Proceedings* 57.

- Gupta, Vinod Kumar, Imran Ali, Tawfik A. Saleh, M. N. Siddiqui, ve Shilpi Agarwal. 2013. "Chromium removal from water by activated carbon developed from waste rubber tires". *Environmental Science and Pollution Research* 20(3).
- Guritno, M. Anom, Riwardi Sihombing, ve Yuni K. Krisnandi. 2016. "Synthesis of porous activated carbon from petroleum sludge using mesoporous silica template". İçinde *AIP Conference Proceedings*,.
- Gurten, I. Isil, Meryem Ozmak, Emine Yagmur, ve Zeki Aktas. 2012. "Preparation and characterisation of activated carbon from waste tea using  $K_2CO_3$ ". *Biomass and Bioenergy* 37: 73-81.
- Güler, İlknur. 2008. "Atık Sulardan Fenol Ve Türevlerinin Biyolojik Yöntemlerle Gideriminin İncelenmesi". *Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi*.
- Gündoğdu, Ali. 2010. "Fabrika Çay Atıklarından Aktif Karbon Üretimi, Karakterizasyonu ve Adsorpsiyon Özelliklerinin İncelenmesi". *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*.
- Gündüzoğlu, Gül. 2008. *Şeker pancarı küspesinden aktif karbon üretimi ve karakterizasyonu*.
- Güneş, Sinem. 2016. *Portakal (Citrus sinensis L.) küspesinden üretilen aktif karbonun sulu çözeltilerden reaktif boyar madde adsorpsiyonunda kullanımı*.
- Gür, N. 1994. "Pestisitlerin Bentonitle Adsorpsiyonu". *İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi Bitirme Ödevi*.
- Hacifazlıoğlu, Hasan, ve Dilara Uçkan. 2014. "Borik asit liçi ile tosya linyit kömüründen kül ve kükürt giderimi". *Madencilik* 53(1-2).
- Hashemian, Saeedeh, Khatereh Salari, ve Zahra Atashi Yazdi. 2014. "Preparation of activated carbon from agricultural wastes (almond shell and orange peel) for adsorption of 2-pic from aqueous solution". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 20(4).
- Hassler, J. 1967. "Activated Carbon". *Chemical Publishing Co. Inc.*
- Hatay, İmren. 2006. "Bazı organik maddelerin inorganik destekler üzerine immobilizasyonu ve adsorban olarak uygulamaları". *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*,.
- Hatt, J. W., E. Germain, ve S. J. Judd. 2013. "Granular activated carbon for removal of organic matter and turbidity from secondary wastewater". *Water Science and Technology* 67(4).

- Hayashi, Jun'ichi, Toshihide Horikawa, Isao Takeda, Katsuhiko Muroyama, ve Farid Nasir Ani. 2002. "Preparing activated carbon from various nutshells by chemical activation with  $K_2CO_3$ ". *Carbon* 40(13): 2381-86.
- Heidarinejad, Zoha, Mohammad Hadi Dehghani, Mohsen Heidari, Gholamali Javedan, Imran Ali, ve Mika Sillanpää. 2020. "Methods for preparation and activation of activated carbon: a review". *Environmental Chemistry Letters* 18(2).
- Helvacı, Naciye Olcay, ve Yasemin Korkmaz. 2024. "Çevre Dostu Hammaddelerden Üretilen Aktif Karbonlar Ve Uygulama Alanları". *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*.
- Hmid, Amine, Donato Mondelli, Saverio Fiore, Francesco Paolo Fanizzi, Ziad Al Chami, ve Stefano Dumontet. 2014. "Production and characterization of biochar from three-phase olive mill waste through slow pyrolysis". *Biomass and Bioenergy* 71.
- Hong, Seok-Min, Seung Wan Choi, Sung Hyun Kim, ve Ki Bong Lee. 2016. "Porous carbon based on polyvinylidene fluoride: enhancement of  $CO_2$  adsorption by physical activation". *Carbon* 99: 354-60.
- Hsu, Li Yeh, ve Hsisheng Teng. 2000. "Influence of different chemical reagents on the preparation of activated carbons from bituminous coal". *Fuel processing technology* 64(1).
- <https://unitechlink.com/ftir-analysis/>. "https://unitechlink.com/ftir-analysis/".
- <https://www.solechem.com/u/aktif-karbon/>.
- Hu, Zhonghua, M. P. Srinivasan, ve Yaming Ni. 2001. "Novel activation process for preparing highly microporous and mesoporous activated carbons". *Carbon* 39(6).
- İlçi, Ayşe. 2017. "Sulu çözeltilerden pestisit adsorpsiyonunda zeytinyağı fabrikası katı atığından (Pirina) elde edilen aktif karbonun kullanılabilirliğinin araştırılması." *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Inglezakis, Vassilis J., ve Stavros G. Pouloupoulos. 2006. Adsorption, Ion Exchange and Catalysis: Design of Operations and Environmental Applications *Adsorption, ion exchange and catalysis: Design of operations and environmental applications*. Elsevier Science.
- Işık, Hilal Arslanoğlu. 2012. *Çeşitli Yöntemlerle Tarımsal Atıklardan Üretilen Aktif Karbonların Karakterizasyonu ve Kesikli Sistemlerde Boyar Madde Giderimine Uygulanması*.

- Jasienko, S. 1981. "Coal as raw material for carbon production: some new aspects". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 300(1453).
- Jiang, Yuting, Jing Li, Zimu Jiang, Mengjiao Shi, Rui Sheng, Zheng Liu, Su Zhang, vd. 2021. "Large-surface-area activated carbon with high density by electrostatic densification for supercapacitor electrodes". *Carbon* 175.
- John W. Hassler. 1974. *Purification with activated carbon*. Leighton Buzzard: International Textbook Company.
- Kacan, Erdal. 2016. "Optimum BET surface areas for activated carbon produced from textile sewage sludges and its application as dye removal". *Journal of Environmental Management* 166: 116-23.
- Kachabi, Mohammed, Imane El Mrabet, Zineb Bencheqroun, Mostafa Nawdali, ve Hicham Zaitan. 2019. "Synthesis and adsorption properties of activated carbon from KOH-activation of Moroccan Jujube shells for the removal of COD and color from wastewater". *Mediterranean Journal of Chemistry* 8(3).
- Khanday, W. A., F. Marrakchi, M. Asif, ve B. H. Hameed. 2017. "Mesoporous zeolite-activated carbon composite from oil palm ash as an effective adsorbent for methylene blue". *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 70.
- Khiari, Bisma, Imen Ghouma, Amel Ibn Ferjani, Ahmed Amine Azzaz, Salah Jellali, Lionel Limousy, ve Mejdi Jeguirim. 2020. "Kenaf stems: Thermal characterization and conversion for biofuel and biochar production". *Fuel* 262.
- Kibbey, Tohren C.G., ve Kim F. Hayes. 1993. "Partitioning and UV Absorption Studies of Phenanthrene on Cationic Surfactant-Coated Silica". *Environmental Science and Technology* 27(10): 2168-73.
- Kiliç, Murat, Esin Apaydin-Varol, ve Ayşe Eren Pütün. 2012. "Preparation and surface characterization of activated carbons from *Euphorbia rigida* by chemical activation with  $ZnCl_2$ ,  $K_2CO_3$ ,  $NaOH$  and  $H_3PO_4$ ". *Applied Surface Science* 261: 247-54. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433212013645> (29 Nisan 2025).
- Kim, Bomi, Yu-ri Lee, Hee- Young Kim, ve Wha-Seung Ahn. 2018. "Adsorption of volatile organic compounds over MIL-125-NH<sub>2</sub>". *Polyhedron* 154: 343-49.
- Kingsresearch. "Activated-carbon-market-531". <https://www.kingsresearch.com/tr/activated-carbon-market-531>.
- Kirscher, M. 2003. "Activated Carbon". *Chemical Market Reporter* 27: 222-64.

- “Kirscher, M., 2006. Ethylene. Chemical Market Reporter, 270(4), 34.”
- Kirubakaran, C. John, K. Krishnaiah, ve S. K. Seshadri. 1991. “Experimental Study of the Production of Activated Carbon from Coconut Shells in a Fluidized Bed Reactor”. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 30(11): 2411-16.
- Konneh, Morris, Simon M. Wandera, Sylvia I. Murunga, ve James M. Raude. 2021. “Adsorption and desorption of nutrients from abattoir wastewater: modelling and comparison of rice, coconut and coffee husk biochar”. *Heliyon* 7(11).
- Kopac, Turkan, ve Fatma Oğuz Erdogan. 2009. “Temperature and alkaline hydroxide treatment effects on hydrogen sorption characteristics of multi-walled carbon nanotube-graphite mixture”. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 15(5): 730-35.
- Kopac, Turkan, ve Yigit Kırca. 2020. “Effect of ammonia and boron modifications on the surface and hydrogen sorption characteristics of activated carbons from coal”. *International Journal of Hydrogen Energy* 45(17): 10494-506.
- Kumaş, Cavit. 2015. *Fındık Kabuğundan Aktif Karbon Elde Edilmesinde Fosforik Asit ve Bor Kullanılması*.
- Küçükgül, Enver Yaser. 2004. *Ticari Aktif Karbon Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi*.
- Kürkçü, Esin A. “Boya Sektöründe Solvent Kullanımı: İş Güvenliği Açısından Tehlikeleri Ve Alınması Gereken Önlemler”. [https://www.sadettinorhan.net/uploads/4/4/6/2/4462391/ig5-boya\\_sektorunde\\_solvent\\_kullanimi.pdf?](https://www.sadettinorhan.net/uploads/4/4/6/2/4462391/ig5-boya_sektorunde_solvent_kullanimi.pdf?)
- Langmuir, Irving. 1918. “The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum”. *Journal of the American Chemical Society* 40(9).
- Liang, Jingyi, Chao Li, Shu Zhang, Shuang Wang, ve Xun Hu. 2024. “Sequential activation of willow wood with ZnCl<sub>2</sub> and H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> drastically impacts pore structure of activated carbon”. *Industrial Crops and Products* 221: 119387. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669024013645> (29 Nisan 2025).
- Li, Lei, Patricia A. Quinlivan, ve Detlef R.U. Knappe. 2002. “Effects of activated carbon surface chemistry and pore structure on the adsorption of organic contaminants from aqueous solution”. *Carbon* 40: 2085-2100.

- Liou, Tzong Horng. 2010. "Development of mesoporous structure and high adsorption capacity of biomass-based activated carbon by phosphoric acid and zinc chloride activation". *Chemical Engineering Journal* 158(2).
- Lu, L., S. Devasahayam, ve V. Sahajwalla. 2013. "Evaluation of coal for metallurgical applications". İçinde *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production*,.
- Lv, Songlei, Chunxi Li, Jianguo Mi, ve Hong Meng. 2020. "A functional activated carbon for efficient adsorption of phenol derived from pyrolysis of rice husk, KOH-activation and EDTA-4Na-modification". *Applied Surface Science* 510.
- Mahapatra, Kalyani, D. S. Ramteke, ve L. J. Paliwal. 2012. "Production of activated carbon from sludge of food processing industry under controlled pyrolysis and its application for methylene blue removal". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 95.
- Malini, K., D. Selvakumar, ve N. S. Kumar. 2023. "Activated carbon from biomass: Preparation, factors improving basicity and surface properties for enhanced CO<sub>2</sub> capture capacity - A review". *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* 67.
- Medhat, Ahmed, Heba H. El-Maghrabi, Amr Abdelghany, Nabil M. Abdel Menem, Patrice Raynaud, Yasser M. Moustafa, Mohamed A. Elsayed, ve Amr A. Nada. 2021. "Efficiently activated carbons from corn cob for methylene blue adsorption". *Applied Surface Science Advances* 3.
- Mehmet Emin Ergün, Filiz Koyuncu, Abdullah İstek, İsmail Özlüsoylu, Şaban Bülbül, ve Ayben Kılıç-Pekgözlü. 2025. "Utilization of orange peel waste for activated carbon production and its application in particleboard for formaldehyde emission reduction". *Biofuels, Bioproducts and Biorefining (Biofpr)*: 690-704.
- Menéndez-Díaz, J. A., ve I. Martín-Gullón. 2006a. "Chapter 1 Types of carbon adsorbents and their production". *Interface Science and Technology* 7(C): 1-48.
- Menéndez-Díaz, J. A., ve I. Martín-Gullón. 2006b. 7 *Interface Science and Technology Types of carbon adsorbents and their production. Activated carbon surfaces in environmental remediation.*
- Mihçioğur, Hamdi. 2009. *Atıksulardan Cr<sup>+6</sup> İyonunun Sentetik ve Doğal Maddeler Kullanılarak Adsorpsiyonla Giderimi Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*,.
- Misran, Erni, Okta Bani, Elfrida Margaretha Situmeang, ve Adelina Suciani Purba. 2022. "Banana stem based activated carbon as a low-cost adsorbent for methylene blue

- removal: Isotherm, kinetics, and reusability”. *Alexandria Engineering Journal* 61(3).
- Mohammad Razi, Mohd Adib, Adel Al-Gheethi, Mohammed Al-Qaini, ve Anwar Yousef. 2018. “Efficiency of activated carbon from palm kernel shell for treatment of greywater”. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences* 25(3). doi:10.1080/25765299.2018.1514142.
- Mohammed, Shahad Salim. 2015. “Effect of pH on the Turbidity Removal of Wastewater”. *OALib* 02(12).
- Mohd Radhuwan, Siti Nasuha, Ahmed Saud Abdulhameed, Ali H. Jawad, Zeid A. ALOthman, Lee D. Wilson, ve Sameer Algburi. 2024. “Production of activated carbon from food wastes (chicken bones and rice waste) by microwave assisted ZnCl<sub>2</sub> activation: an optimized process for crystal violet dye removal”. *International Journal of Phytoremediation* 26(5).
- mordorintelligence. “Mordorintelligence reports activated-carbon-market”. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/activated-carbon-market>.
- Mostafa, MR., SE Sarma, ve AM. Yousef. 1989. “Removal of organic pollutants from aqueous solution: Part 1. Adsorption of phenols by activated carbons”. *Indian Journal of Chemistry*: 946-48.
- Mozammel, Hoque M., Ota Masahiro, ve S. C. Bhattacharya. 2002. “Activated charcoal from coconut shell using ZnCl<sub>2</sub> activation”. *Biomass and Bioenergy* 22(5): 397-400.
- Mudoga, H. L., H. Yucel, ve N. S. Kincal. 2008. “Decolorization of sugar syrups using commercial and sugar beet pulp based activated carbons”. *Bioresource Technology* 99(9): 3528-33.
- Mukome, Fungai N.D., Xiaoming Zhang, Lucas C.R. Silva, Johan Six, ve Sanjai J. Parikh. 2013. “Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks”. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61(9).
- Nedjai, R., N. A. Kabbashi, M. Z. Alam, ve M. F.R. Al-Khatib. 2021. “Production and Characterization of Activated Carbon from Baobab Fruit Shells by Chemical Activation Using ZnCl<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> and KOH”. İçinde *Journal of Physics: Conference Series*.
- Oğuz, Ahmet. 2013. “Harran ovasında yaygın olarak üretilen pamuk ve mısır sapından aktif karbon üretimi”. *Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.

- Okiel, Khaled, Mona El-Sayed, ve Mohamed Y. El-Kady. 2011. "Treatment of oil–water emulsions by adsorption onto activated carbon, bentonite and deposited carbon". *Egyptian Journal of Petroleum* 20(2).
- Okman, Irem, Selhan Karagöz, Turgay Tay, ve Murat Erdem. 2014. "Activated Carbons From Grape Seeds By Chemical Activation With Potassium Carbonate And Potassium Hydroxide". *Applied Surface Science* 293: 138-42. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433213024069> (30 Nisan 2025).
- Olivares-Marín, M., C. Fernández-González, A. Macías-García, ve V. Gómez-Serrano. 2006. "Preparation of activated carbon from cherry stones by chemical activation with ZnCl<sub>2</sub>". *Applied Surface Science* 252(17).
- Orta Anadolu Kalkınma Ajansı. 2021. *Sivas İli Aktif Karbon Üretimi Ön Fizibilite Raporu*.
- Ödemir, Derya, Saban Bülbül, ve Mehmet Emin Ergün. 2023. "Production of activated carbon from the waste paper by chemical activation method". *International Advanced Researches and Engineering Journal* 7(1). doi:10.35860/iaej.1222591.
- Önal, Y., C. Akmil-Başar, Didem Eren, Çigdem Sarici-Özdemir, ve Tolga Depci. 2006. "Adsorption kinetics of malachite green onto activated carbon prepared from Tunçbilek lignite". *Journal of Hazardous Materials* 128(2-3).
- Öner, Akın. 2009. "Yanıcı/Parlayıcı Sıvı Depolanan Binalarda Yangın Güvenliği Ve Söndürme Sistemleri". *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*.
- Özcan, Adnan, Elif Mine Öncü, ve A. Safa Özcan. 2006. "Adsorption of Acid Blue 193 from aqueous solutions onto DEDMA-sepiolite". *Journal of Hazardous Materials* 129(1-3).
- Özdemir. 2009. "Aktif Karbon Üretim Sürecinin Termogravimetrik Analiz İle İncelenmesi". *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü*.
- Özdemir D. 2023. "Atık Kağıttan Üretilen Aktif Karbonun Kauçuk Matrisli Bileşiklerde Kullanımı Ve Karakterizasyonu". *Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*.
- Özdemir Derya. 2023. "Atık Kâğıttan Üretilen Aktif Karbonun Kauçuk Matrisli Bileşiklerde Kullanımı ve Karakterizasyonu". *Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.

- Özdemir, Işıl. 2013. “Şarap endüstrisi artığı üzüm saplarından aktif karbon eldesi ve karakterizasyonu”. *Firat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Özdoğan, Nizamettin, ve Kadir ÖZDEMİR. 2019. “İçme Suyu Kaynaklarındaki Trihalometan Oluşumunun İncelenmesi”. *European Journal of Science and Technology*: 776-85.
- Özpınar, Pelin. 2021. “Fındık kabuğundan üretilen aktif karbonların süperkapasitör elektrotlarında kullanımı ”. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Özyılmaz, Demir. 2023. “ Portakal posasından (citrus sinensis l.) kimyasal aktivasyon ile aktif karbon üretiminde proses parametrelerinin etkisinin incelenmesi”. *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Pagalan, Efren, Michell Sebron, Shaina Gomez, Sheena Jane Salva, Renzey Ampusta, Aira Joy Macarayo, Cherry Joyno, Alexander Ido, ve Renato Arazo. 2020. “Activated carbon from spent coffee grounds as an adsorbent for treatment of water contaminated by aniline yellow dye”. *Industrial Crops and Products* 145.
- Paredes-Laverde, Marcela, Maurin Salamanca, Javier D. Diaz-Corrales, Elizabeth Flórez, Javier Silva-Agredo, ve Ricardo A. Torres-Palma. 2021. “Understanding the removal of an anionic dye in textile wastewaters by adsorption on ZnCl<sub>2</sub>activated carbons from rice and coffee husk wastes: A combined experimental and theoretical study”. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9(4).
- Patrick, John W. 1995. “Porosity in Carbons: Characterization and Applications”. *Great Britain*.
- Pendleton, P., S. H. Wong, R. Schumann, G. Levay, R. Denoyel, ve J. Rouquerol. 1997. “Properties of activated carbon controlling 2-Methylisoborneol adsorption”. *Carbon* 35(8): 1141-49.
- Pereira, Manuel Fernando R., Samanta F. Soares, José J.M. Órfão, ve José L. Figueiredo. 2003. “Adsorption of dyes on activated carbons: influence of surface chemical groups”. *Carbon* 41(4): 811-21.
- Plaza, M. G., C. Pevida, C. F. Martín, J. Feroso, J. J. Pis, ve F. Rubiera. 2010. “Developing almond shell-derived activated carbons as CO<sub>2</sub> adsorbents”. *Separation and Purification Technology* 71(1).
- Qin, Chong, Yao Chen, ve Jian Min Gao. 2014. “Manufacture and characterization of activated carbon from marigold straw (Tagetes erecta L) by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> chemical activation”. *Materials Letters* 135.

- Raut, Ekta R., Monita A. Bedmohata, ve Archana R. Chaudhari. 2022. "Comparative study of preparation and characterization of activated carbon obtained from sugarcane bagasse and rice husk by using  $H_3PO_4$  and  $ZnCl_2$ ". İçinde *Materials Today: Proceedings*,.
- Ray, Suprakas Sinha, Rashi Gusain, ve Neeraj Kumar. 2020. Carbon Nanomaterial-Based Adsorbents for Water Purification: Fundamentals and Applications *Carbon Nanomaterial-Based Adsorbents for Water Purification: Fundamentals and Applications*.
- Rodriguez, José Alexander, José Ferreira Lustosa Filho, Leônidas Carrijo Azevedo Melo, Igor Rodrigues de Assis, ve Teógenes Senna de Oliveira. 2020. "Influence of pyrolysis temperature and feedstock on the properties of biochars produced from agricultural and industrial wastes". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 149(104839).
- Rodríguez-Sánchez, S., P. Díaz, B. Ruiz, S. González, M. Díaz-Somoano, ve E. Fuente. 2022. "Food industrial biowaste-based magnetic activated carbons as sustainable adsorbents for anthropogenic mercury emissions". *Journal of Environmental Management* 312.
- Rosas, Juana M., Jorge Bedia, J. Rodríguez-Mirasol, ve Tomás Cordero. 2008. "Preparation of hemp-derived activated carbon monoliths. adsorption of water vapor". *Ind. Eng. Chem. Res.* 47: 1288-96.
- Rouquerol J., ve Sing K. 1999. "Adsorption by powders and porous solids Academic Press, San Diego". *Vakuum in Forschung und Praxis*: 404-404.
- Roy, Glenn M. 2023. Activated Carbon Applications in the Food and Pharmaceutical Industries *Activated Carbon Applications in the Food and Pharmaceutical Industries*. Routledge. New York.
- Ruofei, C., L Liqing, L Zheng, L Mingming, W Chunhao, L Hailong, M Weiwu, ve W Shaobin. 2017. "Preparation and characterization of activated carbons from tobacco stem by chemical activation". *Journal of the Air and Waste Management Association* 67(6): 713-24.
- Russ, Winfried, ve Markus Schnappinger. 2007. "Waste related to the food industry: A challenge in material loops". İçinde *Utilization of By-Products and Treatment of Waste in the Food Industry*,.
- Sarıkaya, Yüksel. 2005. *Sarıkaya, Y., 2005, Fizikokimya, Gazi Kitapevi, 1151 s. Gazi Kitapevi*.

- Saygılı, Hasan, ve Fuat Güzel. 2016. "High surface area mesoporous activated carbon from tomato processing solid waste by zinc chloride activation: Process optimization, characterization and dyes adsorption". *Journal of Cleaner Production* 113.
- Schmidt, P. C. 1998. "Particle and Surface Characterisation Methods. Von R. H. Müller und W. Mehnert, 280 Seiten, 140 Abbild., 29 Tab., medpharm Scientific Publishers Stuttgart 1997, DM 62,-, ISBN 3-88763-057-2". *Pharmazie in Unserer Zeit* 27(2).
- Sevimli, Kadir. 2017. *Kimyasal Aktivasyon Yöntemi Kullanılarak Atık Çay Çalılarından Aktif Karbon Üretimi*.
- Shah, Syed Shaheen, Md Abdul Aziz, Laiq Zada, Haroon Ur Rahman, Falak Niaz, ve Khizar Hayat. 2023. "Carbonate salts-activated carbon". İçinde *Biomass-Based Supercapacitors: Design, Fabrication and Sustainability*.
- Shoote, Ntaote David, Patience Mapule Thabede, ve Eliazer Bobby Naidoo. 2019. "Simultaneous adsorptive study of toxic metal ions in quaternary system from aqueous solution using low cost black cumin seeds (*Nigella sativa*) adsorbents". *South African Journal of Chemical Engineering* 30.
- Shrestha, Lok Kumar, Mamata Thapa, Rekha Goswami Shrestha, Subrata Maji, Raja Ram Pradhananga, ve Katsuhiko Ariga. 2019. "Rice Husk-Derived High Surface Area Nanoporous Carbon Materials with Excellent Iodine and Methylene Blue Adsorption Properties". *C* 5(1).
- Sing, K. S.W., D. H. Everett, R. A.W. Haul, L. Moscou, R. A. Pierotti, J. Rouquerol, ve T. Siemieniewska. 1985. "Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity". *Pure and Applied Chemistry* 57(4).
- Smisek, Milan, ve Slavoj Cerny. 1970. "New books - Active carbon: Manufacture, properties, and applications". *Analytical Chemistry* 42(14).
- Suriyanon, Nakorn, Jutima Permrunguang, Jidanan Kaosaiphun, Aunnop Wongrueng, Chawalit Ngamcharussrivichai, ve Patiparn Punyapalakul. 2015. "Selective adsorption mechanisms of antilipidemic and non-steroidal anti-inflammatory drug residues on functionalized silica-based porous materials in a mixed solute". *Chemosphere* 136.
- Sydney Ross, ve James P. Olivier. 1964. "On Physical adsorption". *John Wiley and Sons*: 137-39.

- Şamdan, Canan Aydın. 2013a. “Kabak Çekirdeği Kabuğundan Kimyasal Aktivasyonla Aktif Karbon Üretimi. Boya ve Ağır Metal Gideriminde Değerlendirilmesi”. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Şamdan, Canan Aydın. 2013b. *Preparation of Activated Carbon From Pumpkin Seed Shell By Chemical Activation. Using For Removal of Dye and Heavy Methal.*
- Şener, Aysun, ve M.Ümit Ünal. 2008. *Gıda sanayi atıklarının biyoteknolojik yöntemlerle değerlendirilmesi.* Erzurum.
- Thabede, Patience Mapule, Ntaote David Shooto, ve Eliazer Bobby Naidoo. 2020. “Removal of methylene blue dye and lead ions from aqueous solution using activated carbon from black cumin seeds”. *South African Journal of Chemical Engineering* 33.
- Thabede, Patience Mapule, Ntaote David Shooto, Thokozani Xaba, ve Eliazer Bobby Naidoo. 2020. “Adsorption studies of toxic cadmium(II) and chromium(VI) ions from aqueous solution by activated black cumin (*Nigella sativa*) seeds”. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8(4).
- Theamwong, Nidchakarn, Wimonsiri Intarabumrung, Suwivat Sangon, Suphattra Aintharabunya, Yuvarat Ngernyen, Andrew J Hunt, ve Nontipa Supanchaiyamat. 2021. “Activated carbons from waste *Cassia bakeriana* seed pods as high-performance adsorbents for toxic anionic dye and ciprofloxacin antibiotic remediation”. *Bioresource Technology*: 345.
- Thommes, Matthias. 2016. “Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)”. *Chemistry International* 38(1). doi:10.1515/ci-2016-0119.
- Toles, C., S. Rimmer, ve J. C. Hower. 1996. “Production of activated carbons from a washington lignite using phosphoric acid activation”. *Carbon* 34(11).
- Tonucci, Marina Caldeira, Leandro Vinicius Alves Gurgel, ve Sérgio Francisco de Aquino. 2015. “Activated carbons from agricultural byproducts (pine tree and coconut shell), coal, and carbon nanotubes as adsorbents for removal of sulfamethoxazole from spiked aqueous solutions: Kinetic and thermodynamic studies”. *Industrial Crops and Products* 74.
- Trade Map. “Trade Map”. <https://www.trademap.org/Index.aspx>.
- Tsai, W. T., C. Y. Chang, S. Y. Wang, C. F. Chang, S. F. Chien, ve H. F. Sun. 2001. “Preparation of activated carbons from corn cob catalyzed by potassium salts and subsequent gasification with CO<sub>2</sub>”. *Bioresource Technology* 78(2): 203-8.

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852400001115> (30 Nisan 2025).
- Türkyılmaz, Aydın, ve Kaan Işınkaralar R. 2020. “Sulu Çözeltilerden Aktif Karbon Üzerine Adsorpsiyon ile Antibiyotiklerin (Tetrasiklin ve Penisilin G) Giderimi”. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 8(3).
- Utku, Tuğba. 2021. “Biyokütle karışımlarının farklı sıcaklık ve ısıtma hızlarında karbonizasyonu ile karbonize ürünlerden KOH kullanılarak aktif karbon eldesi ve karakterizasyonu”. *İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Valencia, Aniyohana, Roberto Muñiz-Valencia, Silvia G. Ceballos-Magaña, Cintia Karina Rojas-Mayorga, Adrian Bonilla-Petriciolet, Jorge González, ve Ismael Alejandro Aguayo-Villarreal. 2022. “Cyclohexane and benzene separation by fixed-bed adsorption on activated carbons prepared from coconut shell”. *Environmental Technology and Innovation* 25.
- Valizadeh, Soheil, Habibollah Younesi, ve Nader Bahramifar. 2018. “Preparation and Characterization of Activated Carbon from the Cones of Iranian Pine Trees (*Pinus eldarica*) by Chemical Activation with  $H_3PO_4$  and Its Application for Removal of Sodium Dodecylbenzene Sulfonate Removal from Aqueous Solution”. *Water Conservation Science and Engineering* 3(4).
- Vázquez-Santos, M. B., F. Suárez-García, A. Martínez-Alonso, ve J. M.D. Tascón. 2012. “Activated carbon fibers with a high heteroatom content by chemical activation of PBO with phosphoric acid”. *Langmuir* 28(13).
- Vural, Naile. 2007. “Paulownia Ağacı Odunundan  $ZnCl_2$  Aktivasyonu Aktifleştirilmiş Karbon Üretimi ve Karakterizasyonu”. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Walther, H.-J. 1983. “Carbon Adsorption Handbook.” *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica* 11(1).
- Wang, Hongyan, Baodong Wang, Junhua Li, ve Tianle Zhu. 2019. “Adsorption equilibrium and thermodynamics of acetaldehyde/acetone on activated carbon”. *Separation and Purification Technology* 209: 535-41.
- Wibowo, Haryo, Danusorn Congsomjit, Tulakarn Ketwong, Tuangsap Rattanol, Wishyes Museesut, Suparat Phunsanga, ve Chinnathan Areeprasert. 2024. “Application of sugarcane bagasse fly ash for syrup decolorization through activated carbon production and the circular utilization of its waste”. *Biomass and Bioenergy* 182: 107066.

- Wigmans, T. 1989. "Industrial aspects of production and use of activated carbons". *Carbon* 27(1).
- www.purehealthywater.com. 2015. "www.purehealthywater.com".
- Xia, Hongying, Song Cheng, Libo Zhang, ve Jinhui Peng. 2016. "Utilization of walnut shell as a feedstock for preparing high surface area activated carbon by microwave induced activation: Effect of activation agents". *Green Processing and Synthesis* 5(1): 7-14.
- Yaashikaa, P. R., P. Senthil Kumar, Sunita Varjani, ve A. Saravanan. 2020. "A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy". *Biotechnology Reports* 28.
- Yagmur, Emine, Meryem Ozmak, ve Zeki Aktas. 2008. "A novel method for production of activated carbon from waste tea by chemical activation with microwave energy". *Fuel* 87.
- Yaman, Kemal. 2012. 12 Journal of Forestry Faculty *Bitkisel Atıkların Değerlendirilmesi ve Ekonomik Önemi*. Kastamonu.
- Yavuz, Reha, Hanife Akyildiz, Nilgün Karatepe, ve Eda Çetinkaya. 2010. "Influence of preparation conditions on porous structures of olive stone activated by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>". *Fuel Processing Technology* 91(1).
- Yıldız M. 2017. "Portakal Kabuklarından Kimyasal Aktivasyonla Aktif Karbon Eldesi Karakterizasyonu Ve Kurşun Adsorpsiyonunda Kullanılması". *Yüzüncüyıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi*.
- Zabaniotou, Anastasia. 2006. "Agricultural residues as precursors for activated carbon production—a review". *Chemical Engineering Department, Aristotle University of Thessaloniki* 11: 1966-2005.
- Zahmatkesh, Sasan, Fatemeh Gholian-Jouybari, Jiří Jaromír Klemeš, Awais Bokhari, ve Mostafa Hajiaghaei-Keshteli. 2023. "Sustainable and optimized values for municipal wastewater: The removal of biological oxygen demand and chemical oxygen demand by various levels of granular activated carbon- and genetic algorithm-based simulation". *Journal of Cleaner Production* 417: 137932.
- Zahoor, Mohammad. 2011. "Bazı Organik Maddelerin Adsorpsiyon-Filtrasyon Ve Adsorpsiyonmebran Hibrid Sistemleri İle Sulardan Uzaklaştırılması". *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*.
- Zeyrek, Ayten. 2019. *Elma (Van) kabuğundan elde edilen aktif karbon ile boyar maddelerin giderilmesi*.

- Zhang, Guizhi, Bingman Lei, Shengming Chen, Hongmei Xie, ve Guilin Zhou. 2021. “Activated carbon adsorbents with micro-mesoporous structure derived from waste biomass by stepwise activation for toluene removal from air”. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9(4).
- Zhang, Huirong, Lijun Zhu, Zihe Pan, Jinglei Cui, Baofeng Wang, Dongke Zhang, Yanxia Guo, ve Fangqin Cheng. 2025. “Exploring the mechanisms of enhanced activated carbon’s toluene adsorption and regeneration by utilizing inherent pyrite in coal”. *Fuel* 386: 134224.
- Zhang, Yue, Rachel Campbell, Mary Anne Drake, ve Qixin Zhong. 2015. “Decolorization of Cheddar cheese whey by activated carbon”. *Journal of Dairy Science* 98(5).