

T.C.  
UŞAK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BENTONİT ve TOZ AKTİF KARBON KULLANILARAK TEKSTİL SANAYİSİ  
ATIK SULARINDA METİLEN MAVİSİNİN GİDERİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ceren CENGİZ

TEMMUZ, 2024  
UŞAK

T.C.  
UŞAK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BENTONİT ve TOZ AKTİF KARBON KULLANILARAK TEKSTİL SANAYİSİ  
ATIK SULARINDA METİLEN MAVİSİNİN GİDERİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ceren CENGİZ

UŞAK, 2024

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ceren CENGİZ



**BENTONİT ve TOZ AKTİF KARBON KULLANILARAK TEKSTİL SANAYİSİ  
ATIK SULARINDA METİLEN MAVİSİNİN GİDERİLMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Ceren Cengiz**

**UŞAK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Temmuz 2024**

**ÖZET**

Tekstil sanayisi atık sularının içermiş olduğu boyar madde kirlilikleri çevreye verdiği zararlar açısından ciddi boyutta tehlike barındırmaktadır. Bu çalışmada tekstil alanında yararlanılan metilen mavisi boyar maddesi kullanılarak ideal adsorpsiyon koşulları altında sulu çözeltiden giderilmesi üzerine denemeler yapılmıştır. pH, sıcaklık, karıştırma hızı, boyar madde konsantrasyonu ve adsorban miktarı parametrelerinin adsorpsiyon prosesi üzerine etkileri incelenmiştir. En yüksek boya giderim verimi bentonit ile %94,32 iken toz aktif karbon ile %99,73 olarak tespit edilmiştir. Farklı sıcaklıklarda izoterm çalışmaları yapılmıştır. Adsorpsiyon davranışı Langmuir, Freundlich ve Temkin izoterm modelleri yardımıyla aydınlatılmış, izoterm sabitleri hesaplanmıştır. Maksimum adsorpsiyon kapasitesine bentonit ile 303,0303 mg/g, toz aktif karbon ile 227,2727 mg/g değerinde ulaşılmıştır. Adsorpsiyon kinetiği yalancı birinci mertebe ve yalancı ikinci mertebe kinetik modeli ile tayin edilmiştir. Gibbs serbest enerjisi, entalpi ve entropi değişim değerleri belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler** : Bentonit, toz aktif karbon, metilen mavisi, adsorpsiyon

**Sayfa Adedi** : 72

**Tez Danışmanı** : Prof. Dr. Menderes LEVENT

**REMOVAL OF METHYLENE BLUE IN TEXTILE INDUSTRY WASTEWATER  
USING BENTONITE and POWDERED ACTIVATED CARBON**

**(M.Sc. Thesis)**

**Ceren Cengiz**

**UŞAK UNIVERSITY  
GRADUATE EDUCATION INSTITUTE  
Chemical Engineering Department**

**July 2024**

**ABSTRACT**

Dye pollution contained in textile industry wastewater poses a serious danger in terms of damage to the environment. In this study, experiments were carried out on the removal of methylene blue dye from aqueous solution under ideal adsorption conditions using methylene blue dye used in the textile field. The effects of pH, temperature, mixing speed, dye concentration and adsorbent amount parameters on the adsorption process were examined. The highest dye removal efficiency was determined as 94.32% with bentonite and 99.73% with powdered activated carbon. Isotherm studies were carried out at different temperatures. Adsorption behavior was elucidated with the help of Langmuir, Freundlich and Temkin isotherm models, and isotherm constants. The maximum adsorption capacity was reached at 303.0303 mg/g with bentonite and 227.2727 mg/g with powdered activated carbon. Adsorption kinetics were determined by pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetic models. Gibbs free energy, enthalpy and entropy change values were determined.

**Keywords** : Bentonite, powdered activated carbon, methylene blue, adsorption  
**Number of pages** : 72  
**Advisor** : Prof. Dr. Menderes LEVENT

## TEŞEKKÜR

Tezim süresince desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her türlü bilgi ve birikimini benimle paylaşan, yolumu aydınlatan danışmanım sayın Prof. Dr. Menderes LEVENT'e,

Her türlü desteği ve katkıları ile yanımda olan değerli akademisyen sayın Prof. Dr. Ufuk BERBEROğLU'na,

Kıymetli yardımını, iyi niyeti, içten desteği, son derecede mütevazı yaklaşımı ve göstermiş olduğu yüksek hassasiyet için sayın Prof. Dr. Safiye Elif KORCAN'a,

Bugünlere gelişimde maddi ve manevi olarak büyük gayret sarf eden, hayatımı her alanda kolaylaştıran, yaşam yolculuğumda bana önderlik eden, desteklerini daima üzerimde hissettiğim değerli aileme,

En yoğun zamanlarında dahi değerli vaktini bana ayıran, pratik yaklaşımları ile sabırla çözüm üreten, donanımını bütün samimiyetiyle paylaşan kıymetli kuzenim Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Aşkın ERDEM'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ BİLDİRİMİ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
RESİMLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER.....	3
2.1. SU KİRLİLİĞİ.....	3
2.2. BOYAR MADDELER.....	5
2.2.1. Boyar Maddelerin Sınıflandırılması.....	5
2.2.2. Metilen Mavisi.....	6
2.3. KİL MİNERALLERİ.....	6
2.3.1. Bentonit.....	7
2.4. BENTONİTİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ.....	8
2.4.1. Özgül Ağırlık.....	8
2.4.2. Şişme Özelliği.....	8
2.4.3. Katyon Değişirme Kapasitesi.....	9
2.4.4. Bentonitin Süspansiyon ve Jel Formu.....	9
2.5. BENTONİTİN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ.....	9
2.6. AKTİF KARBON.....	10

2.6.1. Aktif Karbonun Sınıflandırılması .....	11
2.6.1.1. Toz Aktif Karbon .....	11
2.6.1.2. Granül Aktif Karbon .....	11
2.6.1.3. Pellet Aktif Karbon .....	12
2.6.1.4. Emdirilmiş Aktif Karbon .....	12
2.6.1.5. Polimer Kaplanmış Aktif Karbon .....	12
2.6.1.6. Karbon Moleküler Elek.....	12
2.6.1.7. Aktif Karbon Lifi .....	12
2.7. ADSORPSİYON .....	13
2.8. ADSORPSİYON TÜRLERİ.....	15
2.8.1. Fiziksel Adsorpsiyon.....	15
2.8.2. Kimyasal Adsorpsiyon.....	15
2.8.3. İyonik Adsorpsiyon.....	16
2.9. ADSORPSİYONU ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	16
2.9.1. Adsorbanın Karakteristiği ve Miktarı .....	16
2.9.2. Adsorbatın Karakteristiği ve Derişimi .....	17
2.9.3. pH.....	18
2.9.4. Sıcaklık .....	18
2.9.5. Karıştırma Hızı .....	19
2.10. ADSORPSİYON İZOTERMLERİ.....	19
2.10.1. Langmuir İzotermi .....	20
2.10.2. Freundlich İzotermi.....	21
2.10.3. Temkin İzotermi.....	22
2.11. ADSORPSİYON KİNETİĞİ.....	23
2.11.1. Yalancı Birinci Mertebe Hız Eşitliği.....	24

2.11.2. Yalancı İkinci Mertebe Hız Eşitliği.....	24
2.11.3. Aktivasyon Enerjisi.....	25
2.12. ADSORPSİYON TERMODİNAMİĞİ.....	25
3. LİTERATÜR TARAMASI.....	28
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	34
4.1. MATERYAL VE METOD.....	34
4.1.1. Kullanılan Malzemeler ve Kimyasal Maddeler.....	34
4.1.2. Kullanılan Cihazlar.....	34
4.1.3. Metod.....	34
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	36
5.1. ADSORPSİYON ÇALIŞMALARI.....	36
5.2. ÇÖZELTİ PH'SİNİN ETKİSİ.....	37
5.3. SICAKLIK ETKİSİ.....	39
5.4. BOYA KONSANTRASYONUNUN ETKİSİ.....	40
5.5. ADSORBAN MİKTARININ ETKİSİ.....	42
5.6. KARIŞTIRMA HIZININ ETKİSİ.....	43
5.7. ADSORPSİYON İZOTERMLERİ.....	45
5.8. ADSORPSİYON KİNETİĞİ.....	51
5.8.1. Yalancı Birinci Mertebe Adsorpsiyon Kinetiği.....	52
5.8.2. Yalancı İkinci Mertebe Adsorpsiyon Kinetiği.....	53
5.8.3. Aktivasyon Enerjisi.....	55
5.9. TERMODİNAMİK ANALİZLER.....	57
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	60
KAYNAKLAR.....	62
ÖZGEÇMİŞ.....	71

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1. Farklı konsantrasyonlardaki metilen mavisinin 660 nm’de ölçülen absorbanş değeri .....	36
Çizelge 5.2. Toz aktif karbon ve bentonite ait izoterm sabitleri .....	50
Çizelge 5.3. Toz aktif karbon ve bentonite ait yalancı birinci ve yalancı ikinci mertebé kinetik parametreleri .....	55
Çizelge 5.4. Toz aktif karbon ve bentonite ait termodinamik parametreler.....	58



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Atık sulardaki kirlilik içerikleri .....	4
Şekil 2.2. Metilen mavisinin atomik yapısı .....	6
Şekil 2.3. Bentonit kilinin atomik yapısı .....	8
Şekil 2.4. Aktif karbonun gözenek yapısı .....	11
Şekil 2.5. Adsorpsiyon mekanizması .....	13
Şekil 5.1. Metilen mavisine ait standart eğri .....	37
Şekil 5.2. Adsorpsiyon üzerine çözelti pH'sının etkisi .....	38
Şekil 5.3. Adsorpsiyon üzerine sıcaklığın etkisi .....	40
Şekil 5.4. Adsorpsiyon üzerine boya konsantrasyonunun etkisi.....	41
Şekil 5.5. Adsorpsiyon üzerine adsorban miktarının etkisi .....	43
Şekil 5.6. Adsorpsiyon üzerine karıştırma hızının etkisi .....	44
Şekil 5.7. Farklı toz aktif karbon konsantrasyonlarında metilen mavisine ait Langmuir izotermi .....	45
Şekil 5.8. Farklı bentonit konsantrasyonlarında metilen mavisine ait Langmuir izotermi .....	46
Şekil 5.9. Farklı toz aktif karbon konsantrasyonlarında metilen mavisine ait Freundlich izotermi.....	47
Şekil 5.10. Farklı bentonit konsantrasyonlarında metilen mavisine ait Freundlich izotermi.....	47
Şekil 5.11. Farklı toz aktif karbon konsantrasyonlarında metilen mavisine ait Temkin izotermi .....	48
Şekil 5.12. Farklı bentonit konsantrasyonlarında metilen mavisine ait Temkin izotermi .....	49
Şekil 5.13. Toz aktif karbon üzerine metilen mavisine adsorpsiyonu için elde edilen yalancı birinci mertebeli kinetik modeline ait grafiği .....	52
Şekil 5.14. Bentonit üzerine metilen mavisine adsorpsiyonu için elde edilen yalancı birinci mertebeli kinetik modeline ait grafiği .....	53
Şekil 5.15. Toz aktif karbon üzerine metilen mavisine adsorpsiyonu için elde edilen yalancı ikinci mertebeli kinetik modeline ait grafiği .....	54

Şekil 5.16. Bentonit üzerine metilen mavisi adsorpsiyonu için elde edilen yalancı ikinci merteye kinetik modeline ait grafiği .....	54
Şekil 5.17. Toz aktif karbon üzerine metilen mavisi adsorpsiyonuna ait Arrhenius eğrisi .....	56
Şekil 5.18. Bentonit üzerine metilen mavisi adsorpsiyonuna ait Arrhenius eğrisi .....	56
Şekil 5.19. Toz aktif karbona ait Van't Hoff eşitliği grafiği.....	57
Şekil 5.20. Bentonite ait Van't Hoff eşitliği grafiği .....	58



## RESİMLER DİZİNİ

Resim 5.1. Uygun pH'nın belirlenmesi .....	38
Resim 5.2. Sıcaklığın etkisi .....	39
Resim 5.3. Boya konsantrasyonunun etkisi .....	41
Resim 5.4. Adsorban miktarının belirlenmesi .....	42
Resim 5.5. Uygun karıştırma hızının belirlenmesi .....	44



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simge	Açıklama
%	Yüzde
Kısaltma	Açıklama
$\mu$	Mikro
Å	Angstrom
Al	Alüminyum
B	Bentonit
B <sub>T</sub>	Adsorpsiyon ısısı ile ilgili Temkin sabiti (j/mol)
°C	Derece Santigrat
C	Karbon
C <sub>0</sub>	Başlangıçtaki boyar madde konsantrasyonu (mg/L)
C <sub>e</sub>	Boyar maddenin dengedeki konsantrasyonu (mg/L)
Ca	Kalsiyum
C <sub>a</sub>	Adsorbanın birim kütlesinde tutulan adsorbat konsantrasyonu (mg/L)
CaCl <sub>2</sub>	Kalsiyum klorür
CaCO <sub>3</sub>	Kalsiyum karbonat
Cl	Klor
cm <sup>3</sup>	Santimetreküp
dev	Devir sayısı
dk	Dakika
E <sub>a</sub>	Aktivasyon Enerjisi (kj/mol)
Fe	Demir
g	Gram
H	Hidrojen
HCl	Hidroklorik asit
H <sub>2</sub> O	Su
j	Joule
k <sub>0</sub>	Arrhenius faktörü (g/mol.dk)
k <sub>1</sub>	Yalancı birinci mertebe hız sabiti (dk <sup>-1</sup> )

<b>k<sub>2</sub></b>	Yalancı ikinci mertebe hız sabiti (g/mg.dk)
<b>K<sub>d</sub></b>	Adsorpsiyon denge sabiti
<b>K<sub>F</sub></b>	Adsorpsiyon kapasitesi ile ilgili Freundlich sabiti
<b>k<sub>j</sub></b>	Kilojoule
<b>K<sub>L</sub></b>	Langmuir sabiti (L/mg)
<b>K<sub>T</sub></b>	Temkin izoterm sabiti (L/g)
<b>°K</b>	Derece Kelvin
<b>kcal</b>	Kilokalori
<b>KOİ</b>	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
<b>log</b>	Logaritma
<b>L</b>	Litre
<b>ln</b>	Doğal logaritma
<b>M</b>	Molar
<b>mg</b>	Miligram
<b>ml</b>	Mililitre
<b>mm</b>	Milimetre
<b>Mg</b>	Magnezyum
<b>n</b>	Adsorpsiyon şiddeti ile ilgili Freundlich sabiti
<b>nm</b>	Nanometre
<b>N</b>	Azot
<b>NaOH</b>	Sodyum hidroksit
<b>O</b>	Oksijen
<b>OH<sup>-</sup></b>	Hidroksil
<b>PAC</b>	Toz aktif karbon
<b>pH</b>	Hidrojen potansiyeli
<b>q<sub>e</sub></b>	Adsorplanan madde miktarı (mg/g)
<b>q<sub>edeney.</sub></b>	Adsorplanan madde miktarının deneysel değeri (mg/g)
<b>q<sub>ehesap.</sub></b>	Adsorplanan madde miktarının hesaplanan değeri (mg/g)
<b>q<sub>m</sub></b>	Maksimum adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)
<b>q<sub>t</sub></b>	Herhangi bir andaki adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)
<b>R, R<sub>g</sub></b>	İdeal gaz sabiti, 8,314 (j/mol.K)
<b>R<sub>L</sub></b>	Boyutsuz ayırma faktörü

<b>R<sup>2</sup></b>	Korelasyon katsayısı, regresyon sabiti
<b>rpm</b>	Dakikadaki devir sayısı
<b>S</b>	Kükürt
<b>Si</b>	Silisyum
<b>sn</b>	Saniye
<b>T</b>	Mutlak sıcaklık (°K)
<b>ZnCl<sub>2</sub></b>	Çinko klorür
<b>UV-Vis</b>	Ultraviyole ve görünür ışık spektroskopisi
<b>ΔG°</b>	Standart Gibbs Serbest Enerji Değişimi (kJ/mol)
<b>ΔH°</b>	Standart Entalpi Değişimi (kJ/mol)
<b>ΔS°</b>	Standart Entropi Değişimi (kJ/mol.K)

# 1. GİRİŞ

İnsanoğlu yıllar içinde kendisine sunulan doğal kaynakları sınırsızca kullanarak daha fazla tüketim ile daha iyi standartlarda hayat sürme felsefesini kuşandığı, çevre bilinci gözetmeksizin hareket ederek doğaya karşı son derece düşüncesiz bir tutum sergilemekte, ekolojik dengeye telafisi olmayacak etkiler yansıtmaktadır. Doğaya verilen tahribatın sonuçlarından biri olan iklim değişikliği ile birlikte doğal kaynakların azalması, artan nüfus ve sanayileşme ile su kaynaklarının hızla saflığını kaybederek temiz su ihtiyacının gitgide büyüyen bir sorun haline gelmesine sebep olmaktadır.

Ciddi derecede su kirliliğine yol açan etmenlerin başında gelen tekstil atık suları herhangi bir ön uygulama yapılmaksızın doğaya salındığı takdirde suda bulunan çözünmüş oksijen seviyesinin azalmasına, toksik olarak yarattığı etkiler bakımından suda yaşayan ve suyu tüketen canlıların hayatlarının tehlike altına girmesine, ileri boyutlarda ise yok olmalarına neden olmaktadır (Uysal ve ark., 2015). Denizlere atılan plastik atıklar deniz canlılarına çözülme oranında geçmekte ve onları besin olarak tüketen canlıların dolayısıyla da bizlerin sağlıksız olmasının yolunu açmaktadır. Temiz su kaynaklarının yoğun kimyasallarla kirlenmesi kanser türlerinin artmasına neden olmaktadır (Asri, 2021). Endüstrileşme beraberinde atıkların kaynağında arıtma tesislerinin zorunlu olarak kurulmasını ve yasal düzenlemeleri getirmektedir. Bunların yapılabilmesi adına gelişmiş ülkeler geliştirmekte olan ülkelere teknoloji ve finans desteği sağlamalıdır. Yaşadığımız pandemi gerçeğinde dünyanın ozon tabakasının bir miktar tamir olması ve doğal kaynaklardaki olumlu yönde meydana gelen değişimler bilim dünyasının dikkatini çekmiştir ve araştırma konusu olmuştur.

Suya kirlilik bulaştıran her türlü unsur araştırmacıların üzerinde çalıştıkları konulardandır. Bu konuda çok sayıda inceleme yapılmış kirliliğe yol açan kirleticileri uzaklaştırmaya yarayacak farklı metodlar araştırılmıştır. Bu yöntemlerden bazıları kimyasal çöktürme, iyon değişimi, membran filtrasyonu ve sıklıkla kullanılan bir teknik olan adsorpsiyon prosesidir (Namal, 2017).

Bu tez çalışmasının amacı, tekstil endüstrisinin üretmiş olduğu atık suların adsorpsiyon prosesi ile kirlilik giderimini araştırmaktır. Tekstil endüstrisinde yoğun bir

şekilde kullanılan boyar maddelerden olan metilen mavisinin giderim verimini toz aktif karbon ve bentonit kullanarak incelemektir. Bu doğrultuda Teorik Bilgiler bölümünde su kirliliğine sebep olan faktörler araştırılmış ve tekstil endüstrisinin boyar madde kullanımının çevre kirliliğine olan etkisinin üzerinde durulmuştur. Boyar maddelerin uygulama alanlarına göre sınıflandırılması yapılmış ve çalışmanın boyar maddesi olan metilen mavisinin karakteristiği incelenmiştir. Adsorban olarak seçilen toz aktif karbon ile kil minerallerinden bentonitin yapısal özellikleri izah edilmiştir. Metilen mavisinin sulu çözeltilerden uzaklaştırılmasında uygulanan adsorpsiyon tekniği açıklanmış ve adsorpsiyon çeşitleri ile adsorpsiyonu etkileyen faktörler hakkında bilgi verilmiştir. Prosesin aydınlatılmasında kullanılan Langmuir, Freundlich ve Temkin izoterm modelleri araştırılmıştır. Yalancı birinci mertebe kinetik modeli, yalancı ikinci mertebe kinetik modeli ve aktivasyon enerjisi ile ilgili temel bilgiler verilmiştir. Adsorpsiyon termodinamiğinde standart Gibbs serbest enerji değişimi, standart entalpi ve entropi değişimleri açıklanmıştır. Toz aktif karbon ve kil mineralleri ile daha önceki yapılan adsorpsiyon çalışmalarından bazıları Literatür Taraması kısmında paylaşılmıştır. Deneysel Çalışmalar bölümünde kullanılan kimyasallar ile cihazlar tanıtılmış ve uygulanan metodla ilgili açıklama yapılmıştır. Adsorpsiyonun üzerine sıcaklık, pH, boya konsantrasyonu, adsorban miktarı ve karıştırma hızı parametrelerinin etkileri Bulgular ve Tartışma kısmında sunulmuştur. Langmuir, Freundlich, Temkin izoterm sabitleri hesaplanmış ve prosesin izotermelere uygunluğu aydınlatılmıştır. Kinetik verilerin incelenmesi ile yalancı birinci mertebe ve yalancı ikinci mertebe kinetik modeline uyum durumu izah edilmiştir. Termodinamik incelemeler neticesinde prosesin doğası hakkında bilgi edinilmiş ve adsorpsiyon yürürken sıcaklığın proses üzerine olan etkisi ile hangi koşullarda daha etkin çalışılabileceği yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlar ile oluşturulan grafikler doğrultusunda tüm veriler Sonuç ve Öneriler bölümünde açıklanmış, çevre bilinci gözetilerek atık sulardaki boyar madde kaynaklı kirliliklerin giderilmesi ve azaltılmasının sağlanması adına öneriler sunulmuştur.

## 2. TEORİK BİLGİLER

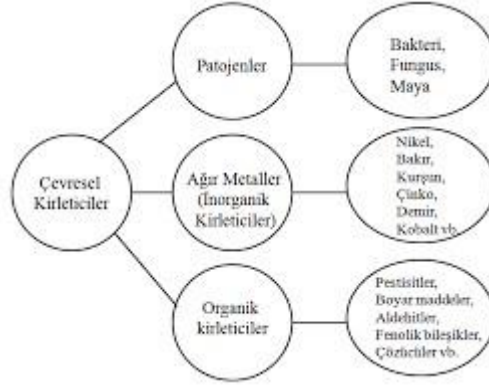
### 2.1 Su Kirliliği

Yaşamsal faaliyetlerin tümü için ihtiyaç duyduğumuz suyun, çeşitli kimyasal ve zararlı mikroorganizma içermeyecek şekilde temini hususu hayati derecede öneme sahiptir. Sonraki aşamada tüketim ve kullanım ardından bünyesine kirlilik bulaştırılan suyun ise hiçbir canlıya zararı dokunmayacak şekilde bertaraf edilmesi elzemdir.

Tekstil sanayisi ve evsel atık sularının kirlilik gideriminde de sudan istifade edilmektedir. Kirleticileri uzaklaştırma işlemi, şehirleşmenin yaygın olduğu bölgelerde kanalizasyon sistemi vasıtasıyla, kırsal kesimlerde ise çukurlar açarak gerçekleştirilmektedir. Alt yapı problemi olan bölgelerde ise atıkların direkt şekilde doğal kaynaklara ulaşması sonucu yüzey ve yer altı suları ciddi derecede kirlilik teşkil etmektedir. Böylelikle alternatifi olmayan yaşam kaynağımız büyük tehlikeler barındıran bir unsur haline dönüşebilmektedir.

Tüm dünyada endüstrileşmenin ve şehirleşmenin getirisi olarak kontrolsüz tüketim neticesinde su kaynaklarındaki kirlilik gün geçtikçe artmaktadır. Atık suların içeriğinde kullanım alanlarına göre farklı türde kirlilik unsurları yer almaktadır.

Şekil 2.1’de görülen suların kirlenmesine yol açan çeşitli kirlilik faktörleri arasında yer alan ağır metaller canlı bünyesinde birikme eğilimi gösterdiği için toksik etkilere yol açmaktadır. Organik kirleticilerden olan pestisit barındıran sularla muamele gören toprakta yetiştirilen her türlü sebze ve meyve, beslenme aracılığıyla insan vücuduna alınarak kısa ve uzun vadede bünyede meydana gelecek pek çok soruna sebep olmaktadır. Aynı şekilde diğer bir organik kirletici olan fenol içerikli bileşiklerin ise sudaki derişik olmayan miktarları dahi yüksek oranda zehir içermekte ve canlı organizmalar üzerinde kansere neden olan etkiler bırakmaktadır (Gündoğdu, 2010).



**Şekil 2.1.** Atık sulardaki kirlilik içerikleri (Sarısoylu Nart, 2024)

Sektörlere göre su kullanım oranlarına bakıldığında kirlilik oluşturan faaliyetlerde ilk sıralarda yer alan tekstil endüstrisidir. Endüstrinin yoğun şekilde çalışma gösterdiği alanlardan olan farklı hammaddelerin işlenmesi ile ortaya çıkan kumaşların boyama işlemi esnasında tüketilen su, kumaşların sahip olduğu tartım miktarının 2 katına kadar çıkmaktadır. Kumaşlara boya ile muamele edilirken %80’lik kısmı kumaşa temas etmekte geri kalan %20’lik kısım ise sulara bırakılmaktadır. Sektöre ait olan atık sular hem görsel kirlilik oluşturması hem de kimyasal ve fiziksel olarak suyun yapısını değiştirmesi bakımından olumsuz etkilere yol açmaktadır.

Endüstrinin meydana getirdiği atık suların 5’te 1’i tekstil sektörüne aittir. Sektörün boyama prosesleri sürerken üretmiş olduğu atık su miktarı hemen hemen 700 bin ton kadardır. Bu miktarın 200 bin tonu ise elverişli şekilde arıtımı gerçekleştirilmeden çevreye salınmaktadır (Sarısoylu Nart, 2024).

Doğal su kaynaklarının azalıyor olması ve mevcut kaynakların da büyük bölümünün kirletilmiş olması sebebi ile sudaki kirliliklerin giderilmesi alternatif olmaya tek çözüm yoludur. Bilim ve teknolojiye yeni yaklaşımlar ile araştırma sonuçları bahsedilen kirlilik yapıcı unsurların düşük seviyeye indirilmesi ve büyük oranda giderilmesinde etkin rol oynamaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen yöntemlerden bazıları kimyasal çöktürme, iyon değişimi, membran filtrasyonu ve adsorpsiyon gibi tekniklerdir. Bu arıtım tekniklerinin arasında yer alan adsorpsiyon metodu organik ve inorganik

içerikli moleküllerin giderilmesi noktasında farklı seçenekler içermesi, verimli sonuçlar elde edilmesi ile basit şekilde yürütülebilmesi açısından sıklıkla tercih edilen proseslerin başında gelmektedir (Kocabıyık, 2023).

## **2.2. Boyar Maddeler**

Tekstil sektörünün yoğunlukla kullandığı maddelerden olan boyar maddeler oldukça ciddi riskleri bünyesinde barındıran, doğaya karşı kısa ve uzun vadede yüksek seviyede zararı dokunan pek çok bozundurma uygulamasına karşı oldukça kararlı olan organik ve inorganik yapıdaki partiküllerdir.

### **2.2.1. Boyar Maddelerin Sınıflandırılması**

Uygulama alanlarına göre sınıflandırılan boyar maddeleri 3 ayrı kategoride incelemek mümkündür:

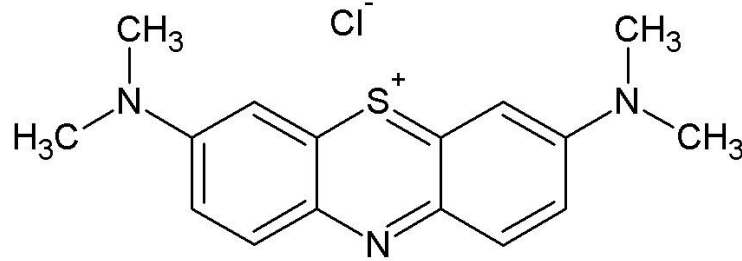
- Katyonik yapıdaki boyar maddeler: Bazik özelliktedir. Parlak olma durumundan kaynaklı ve renk içeriklerinin yüksek olmasından ötürü seyreltilmiş konsantrasyonları dahi suda bulunduğu takdirde görsel açıdan kirlilik oluşturmaktadır. Dünya genelindeki kullanıma bakıldığında 3'üncü sırada bulunan akrilik yapıdaki elyafların boyanması prosesinde katyonik boyalar sarf edilmektedir.
- Anyonik yapıdaki boyar maddeler: Asidik, azo ve diazo boyar maddeler bu grupta yer almaktadır. Su içerisindeki çözünürlük seviyelerinin yüksek olması nedeniyle yerleşik arıtım teknikleriyle uzaklaştırılmaları kolay olmamaktadır.
- Noniyonik boyar maddeler: Suda çözünme gerçekleştirmezler. Su içerisinde iken iyon haline geçemedikleri için dağılma gösterirler. Pigment maddeleri, içeriğinde kükürt dioksit, hidroksit ve amin grupları bulunan dispers boyar maddeler bu sınıfa aittir (Altundal, 2021).

### 2.2.2. Metilen Mavisini

Katyonik yapıdaki boyar maddelerden olan metilen mavisinin yoğunlukla medikal alanında, yün, ahşap, deri, ipek, deri boyamacılığında, resim içerikli sanat dallarında ve mürekkep boyalarında sıklıkla tüketimi söz konusudur.

Metilen mavisinin maruz kalındığı takdirde dolaşım şoku, aşırı terleme, ishal, baş dönmesi, göz rahatsızlıkları, bulantı, kusma gibi insan sağlığına olumsuz sonuçları gözlemlenmiştir.

Kapalı formülü  $C_{16}H_{18}ClN_3S \cdot xH_2O$  olan, amorf özellikte, aromatik tiyazin grubu boyadır. Toz form hali koyu yeşil, suda çözündüğü takdirde koyu mavi renktedir. Sulu çözeltilerinde metilen mavisini katyonu ve  $Cl^{-1}$  anyonu meydana getirir. Molekül ağırlığı 373,9 g/mol'dür. Isıya karşı duyarlıdır. 110 °C'de 2 saat süre ile bırakıldığı takdirde ağırlığının hemen hemen %14'ünü yitirmektedir. Susuz formunun saflık oranı %94,5'tir. Sulu çözeltilerinde köpük meydana getirmektedir (Gündoğdu, 2010). Taşıdığı molekül yapısı Şekil 2.2 ile sunulmuştur.



Şekil 2.2. Metilen mavisinin atomik yapısı (ResearchGate, 2024)

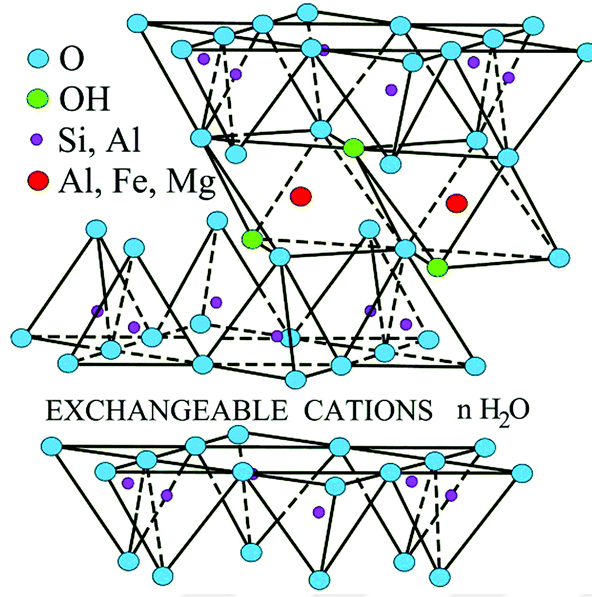
### 2.3. Kil Mineralleri

Killer, maden kaynaklarının iç ve dış faktörlerle ayrışmasıyla oluşan 2 µ ve daha ufak ebattaki partiküllerdir. Ufalanan kayalardan büyük çoğunluğu su ve değişik türdeki çözücülerle muamele görüp kimyasal etkilere maruz bırakıldığında karakteristik özelliklerini kaybederken kil mineralleri sadece boyut olarak küçülüp mevcut yapısını korumaktadır.

Bünyesinde esas olarak montmorillonit minerali, yoğunluklu olarak da silis içeren yumuşak yapıda gözenekli malzemelerdir. Gerçekleştirilen analizler neticesinde içeriğinde silika, alümina, su, demir, alkali ve toprak alkali metallere, kalsit ve daha pek çok mineral barındırdığı ortaya çıkmıştır (Uraz, 2015). Bileşimleriyle bağlantılı olarak gri, mavi, sarı, kırmızı ve kahve tonlarında bulunabilirler (Çetin, 2019).

### **2.3.1. Bentonit**

Bentonit ham maddelerin işlendiği endüstri kollarında jelleşme özelliği ile kalıp için kaynak oluşturan kumların bağlama niteliği kazanmasını sağlar. Yapı işlerinde kullanılan harçların akma özelliğini iyileştirerek ağdalı olmasına katkıda bulunur. Sıvı yağ ve meyve suyu işletmelerinde ürün renklerinin açılmasında kullanılır. Hayvancılık sektöründe yemlerin içine katılarak dolgu maddesi ile mineral desteği sağlar. Tarımsal uygulamalarda gübre katkı maddesi olarak mahsulün gelişimine pozitif yönde etki etmesiyle ürün kalitesinin sürekliliğini sağlamada yardımcıdır. Topaklaşma özelliği sayesinde evcil hayvanların temel bakım ürünlerinden olan hayvan altlıklarının kirliliğinin giderilmesinde kullanılan kumun hammaddesini teşkil eder. Sodyum içerikli bentonitler eczacılıkta merhem dolgu malzemesi olarak kullanılır. Kozmetik sektöründe cilt temizliğinde, saç ve diş bakımında faydalanılır. Su tutma kapasitesinden yararlanarak yangınlarda hava ile olan etkileşimi söndürücü etkisi ile keser. Sodyum içerikli bentonitler matbaacılıkta baskılı yüzeylerde dokunun görsel olarak daha canlı ve parlak olması için, dış cephe boyalarında adsorbe etme özelliğinden dolayı boyanın seri şekilde akmaması için tercih edilmektedir. Tüm bu avantajları ile kil mineralleri pek çok sanayi dalında yoğun bir şekilde yer bulmaktadır (Uraz, 2015). Bentonit kilinin atomik yapısı Şekil 2.3 ile sunulmuştur.



Şekil 2.3. Bentonit kilinin atomik yapısı (Bentonit tedavisi, 2024)

## 2.4. Bentonitin Fiziksel Özellikleri

### 2.4.1. Özgül Ağırlık

Nem içermeyen formdaki bentonitin özgül ağırlığı  $2,7-2,8 \text{ g/cm}^3$  civarındadır. Toza dönüştürülen taneciklerin ise  $0,8-1,1 \text{ g/cm}^3$  aralığındadır.

### 2.4.2. Şişme Özelliği

Suyla temas ettiğinde hacmen genişler ve jelimsi bir yapı meydana getirir. Doğada bulunan pek çok kil minerali içerisinde bir kilin bentonit olarak sınıflandırılabilmesi için kendi hacminin minimum 5 katı kadar genişlemesi lazımdır. Nitelik olarak üstünlüğüyle bağlantılı 30 kata kadar genişleyebilen bentonitler mevcuttur.

Genel olarak montmorillonitler hacmen kristalsi ve ozmotik şekilde büyümektedir. Su moleküllerinin katmanların arasını doldurmasıyla kristalsi şişme meydana gelir. Adsorplanmanın gerçekleştiği su moleküllerinde birinci tabakada oksijen atomlarıyla hidrojen atomları birleşmektedir. Yapısında su içeren katyonları taşıyan

montmorillonitler hacmen 40 Å civarında büyüebilmektedir. Bu çeşit bir genişleme ise ozmotik şişme şeklinde isimlendirilir.

Bünyesinde sodyum minerali bulduran killere nazaran kalsiyum içeren killere nazaran hacmen daha fazla genişleme gösterirler. Bu değişiklik ile yararlandırdığı sektörler üzerinde kilit rol oynamaktadır.

### **2.4.3. Katyon Değişirme Kapasitesi**

Montmorillonit bünyesindeki silisyumun yerini alüminyum, alüminyumun yerini ise magnezyum, demir, çinko ve lityum iyonları alabilmektedir. Gerçekleşen katyon değişimi neticesinde pozitif yük gereksinimi meydana gelir. Bu ihtiyaç sodyum, potasyum, kalsiyum ve magnezyum iyonlarının su fazından kristal kafesine ilişkileriyle ortadan kalkar. Kil minerallerinin tabakaları arasında yer alan sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum gibi iyonlar değişebilir katyonlar olarak isimlendirilir. Kil minerallerinin 100 gramı için adsorpladığı katyonun miliekivalent gramı katyon değişirme kapasitesi olarak bilinmektedir. Bu değer kil mineralleri için 80 ile 150 aralığında olabilir.

### **2.4.4. Bentonitin Süspansiyon ve Jel Formu**

%1 veya 2 oranında bentonit su karışımı çalkalandığında bentonit su içerisinde çözünmeden asılı şekilde kalmaktadır. Bu karışım bir tek elektrolitik şekilde dondurulabilir. Söz konusu bentonit nitelik bakımından üstün ise meydana gelen jel hızlı bir şekilde katılaştır. 1:15 bentonit içeren sudaki eriyik, ilk etapta akıcı haldedir ve giderek katı bir hal alır. Bentonit tanecikleri negatif yük buldukları için su ortamında hareket halindeyken birbirlerine kuvvet uygulayarak birbirlerini kendilerinden uzağa sevk ederler. Bu durum alkol, aseton ve bunun gibi likitler için geçerli değildir. Bentonitin hacim genişlemesi sadece su ile muamele gördüğünde ortaya çıkmaktadır.

### **2.5. Bentonitin Kimyasal Özellikleri**

Bentonit kimyevi oluşumunda çoğunlukla %65,4 silika, %23,2 alüminyum oksit, %3,6 magnezyum oksit içermektedir. Genellikle bentonitin birleşimine giren maddeler ve maddelerin oranları  $Si_8Al_4O_4(OH)_4xH_2O$  şeklinde ifade edilir. Bazı durumlarda esas

örgüde atomların bulunduğu yerden başka yerlere geçmesi dolayısıyla bünyesinde değişik parçacıklar da bulunabilmektedir (Güven, 2010).

## 2.6. Aktif Karbon

Oldukça geniş iç yüzey alanı ve gözenekliliği bulunan maddeler aktif karbon olarak tanımlanabilmektedir. Kompleks karakteristiği belli bir formül veya analiz ile tespit edilememektedir. Adsorpsiyon prosesinde çözelti içerisindeki partikülleri, gözenekleri vasıtasıyla iç kısımlarına taşıyabilmeleri ve üstün adsorplama kapasitesi bulunması sayesinde geçerliliğini her zaman koruyan bir adsorban türüdür (Özcan, 2013).

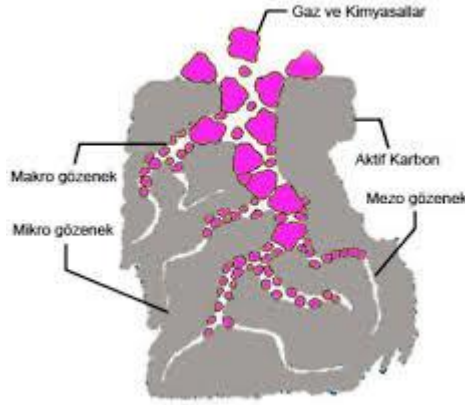
Tarihte aktif karbonun farklı uygulamalarda kullanılmış olduğu pek çok kaynakta yer almaktadır. Milattan önceki dönemde Mısır medeniyetlerine ait papirüslerde tıp alanında faydalandığına dair izler mevcuttur. Hipokrat'ın yaralanmalarda oluşan kötü kokuları ortadan kaldırmak için aktif karbondan faydalandığı bilinmektedir. Eski çağlarda Hindu kavimler kullanma sularını aktif karbon kullanarak arındırmışlardır. 1700'lü yıllarda aktif karbonun kullanıldığı likitlerde renkleri uzaklaştırdığı keşfedilmiştir. 1800'lü yıllarda kristal şeker üretim sürecinde koyu olan şerbet renklerini açmada yararlanılmıştır. 1. Dünya Savaşında klor gazından korunmak için aktif karbon içeren maskeler ile birlikte savunma maksadıyla kullanımı ortaya çıkmıştır.

Sulardaki istenmeyen tat ve kokuları gidermede, eczacılıkta kullanılan ürünlerin saflaştırılmasında, toplu yerleşke ve çalışma ortamlarındaki havalandırma sistemlerinde hava kalitesini arttırma uygulamalarında, sigara ağızlıklarında filtre yardımcı maddesi olarak, yiyecek işletmeleri tarafından gıda maddelerinin saflaştırma işleminde, endüstriyel atık sulardan kirliliklerin uzaklaştırılmasında, hayvancılıkta yem içeriklerine katkı maddesi olarak, şarap eldesinde koyu renkli pigment maddelerini bertaraf etmede ve daha pek çok sektörde etkin biçimde kullanılmaktadır (Gündüzoğlu, 2008).

Aktif karbonun gözenek yarıçapı 3 ayrı kategoride incelenmektedir:

- 50 nm'den büyük ise makro gözenek
- 2 nm ile 50 nm aralığında ise mezo gözenek
- 2 nm'den küçük ise mikro gözenek (Savaş, 2023).

Aktif karbonun gözenek yapısı Şekil 2.4 ile görünür kılınmıştır.



Şekil 2.4. Aktif karbonun gözenek yapısı (Kılıç, 2018)

Adsorpsiyon prosesinde adsorbanın gözenek yarıçapı makro ise taneciklerin adsorbana nüfuz etmesine, mezo ise nüfuz ettikten sonra daha ileri kısımlara ulaşmasına, mikro olduğu durumda da taneciklerin yüzeyde tutunmasına yol açmaktadır (Savaş, 2023).

### 2.6.1. Aktif Karbonun Sınıflandırılması

Aktif karbonlar fiziksel özelliklerine göre 7 farklı şekilde sınıflandırılabilir.

#### 2.6.1.1. Toz Aktif Karbon

Çoğunlukla toz halinde yahut ince parçacıklar şeklinde 100 mm'den daha küçük boyutta üretilmektedir. Aktif karbonun toz formu baca gazlarında arıtım amaçlı ve sıvı faz içerikli proseslerde tercih edilmektedir.

#### 2.6.1.2. Granül Aktif Karbon

Toz aktif karbona nazaran daha ufak yüzey alanı mevcuttur. Gaz ve buhar difüzyonu uygulamalarında hızlı etkileşimlerinden ötürü yararlanılmaktadır. Sulardaki kirlilik yapıcı unsur ve kötü kokuların uzaklaştırılmasında, kompleks yapıli birleşik sistemlerin ayırma işlemlerinde kullanılmaktadır.

### **2.6.1.3. Pellet Aktif Karbon**

0,8 ile 5 mm aralığında çapa sahip, basınç altında preslenerek silindirik şekil verilen aktif karbon çeşididir. Yapı bakımından dayanıklı oluşu ve toz içeriğinin az olması nedeniyle gaz fazı uygulamalarında tercih edilmektedir.

### **2.6.1.4. Emdirilmiş Aktif Karbon**

İçeriğinde gümüş, iyot, alüminyum, magnezyum, ketonlar, tersiyer aminler bulunan karbonlarla oluşturulmaktadır. Hava kalitesinin sürekliliğinin sağlanması gereken kapalı mekanlarda yararlanılmaktadır.

### **2.6.1.5. Polimer Kaplanmış Aktif Karbon**

Gözenekli yapıdaki karbonların pürüz içermeyen ve geçirgen olan biyouyumlu polimeri çevreleyecek şekilde, kalınlığı fazla olmayan katman biçiminde örtülerek elde edilmektedir.

### **2.6.1.6. Karbon Moleküler Elek**

Aktif karbonun gaz adsorpsiyon prosesinde ayırma sistemlerinde kullanılan muntazam biçimli, 0,1 nm çapında, korozyona dirençli olan türüdür.

### **2.6.1.7. Aktif Karbon Lifi**

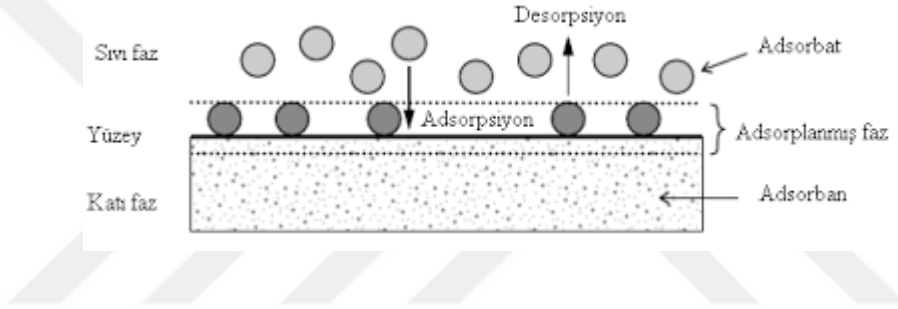
Farklı türdeki reçine ve liflerin yüksek sıcaklık ve inert atmosfer koşullarında karbonizasyon sonrası aktive edilmesiyle oluşan aktif karbon türüdür. Bu işlemlerin ardından meydana gelen aktif karbon lifinin diğer aktif karbonlarla kıyaslandığında öne çıkan özellikleri şu şekildedir:

- Muntazam gözenek yapısı sayesinde gerçekleşen etkileşim daha etkindir.
- Sahip olduğu lif yarıçapı, kullanıldığı proseslerin daha hızlı gerçekleşmesini sağlar.
- Grafit kökenli karakteristiği ile iletkenlik kapasitesi ve sıcaklık direnci daha yüksektir.

- Elastikiyeti ve dayanıklı yapısı ile kağıt endüstrisi ve giysi sektöründe yer bulmaktadır (Oğuz, 2013).

## 2.7. Adsorpsiyon

Adsorpsiyon terimi aynı veya farklı fazlar arasında gerçekleşen madde birikimi, toplaşması olarak tanımlanabilir. İşlem süreci bir fazın yüzey tabakasında gaz yahut suda çözünebilen bir maddenin moleküler film meydana getirmesi biçiminde ilerlemektedir. Yüzey tabakasında yoğunlaşmanın meydana geldiği madde adsorban veya adsorbent, biriken madde ise adsorbat olarak ifade edilmektedir (Öztürk, 2017). Adsorpsiyon prosesinin tersi yönünde gerçekleşen olay ise desorpsiyon adıyla isimlendirilmektedir (Aydın, 2023). Şekil 2.5 ile adsorpsiyon süreci görsel olarak paylaşılmıştır.



Şekil 2.5. Adsorpsiyon mekanizması (Baysal, 2016)

Katı ve sıvı faz arasında gerçekleşen adsorpsiyon prosesinden tekstil endüstrisi atık sularının arıtılmasında büyük oranda yararlanılmaktadır. Suyun arıtımı gerçekleştirilirken bu tekniğin kullanıldığı belli başlı hususlar şu şekilde sıralanabilir:

- Evsel atıksuların içerdiği temizlik maddelerinin kalıntılarının giderilmesinde,
- Sudaki klorun giderilmesinde,
- Zirai kalıntıların sudan uzaklaştırılmasında,
- Endüstrinin getirisi olan atık suların içerdiği kimyasalların giderilmesinde,
- Toksik içerik barındıran suların arıtılmasında,
- Hoş olmayan aroma ve kokuların uzaklaştırılmasında,

- Evsel ve endüstriyel atık suların içerdiği kirlilik parametrelerinden olan kimyasal oksijen gereksinimi KOİ'nin seviyesinin azaltılmasında,
- Birtakım ağır metallerin uzaklaştırılmasında kullanılmaktadır.

Suların arıtılmasında adsorpsiyon prosesi yürütülürken farklı kimyasal içeriklerden yararlanılmaktadır. Adsorban olarak kullanılan bazı maddelere örnek olarak reçineler, silika jel, aktif alümina, kil mineralleri ve aktif karbon verilebilir (Çeşmeli, 2011).

Katı ve sıvı faz arasında gerçekleşen adsorpsiyon prosesinde suda çözülmüş moleküllerin ara yüzey tabakasında toplaşması, adsorbat ile çözücü madde arasında gerçekleşen çekim ilişkilerine bağlıdır. Adsorban madde, sıvıda çözülmüş şekilde duran tanecikleri (adsorbat), proses devam ederken tutarak homojen karışımdan uzağa sevk eder. Büyük taneciklerin adsorban maddenin gözeneklerinde bulunan büyük alanlı tabakalarda tutulması sağlanır. Homojen karışımdan adsorban tarafına olan madde iletimi, karışımda mevcut çözülmüş halde bulunan maddenin, adsorplanmış molekülün derişimi ile denge söz konusu oluncaya kadar sürmektedir. Denge oluştuğunda çözülmüş molekül iletimi devam etmez ve stabil durum koşulları oluşur. Farklı iki fazda çözünen moleküllerin dengedeki yayılım durumları, bu prosesin karakteristik yapısıdır ve prosesin gerçekleştirileceği alanın kapsamının tayin edilmesinde kritik bir husustur. Adsorpsiyonun meydana gelebilmesi için gerekenler şu şekilde sıralanabilir:

- Adsorban maddenin yüzey tabakasına tutunma gerçekleştirecek, çözünen sağlayan moleküller ilk etapta adsorban maddeyi saran çözücü sıvı film içinden ilerlemelidir. Meydana gelen bu geçiş film difüzyonu olarak isimlendirilmektedir.
- Adsorban maddenin yüzey tabakasına temas eden moleküllerin irili ufaklı boşluklarının iç bölgelerine sızabilmesi tanecik içi difüzyon ile isimlendirilen olayı başarabilmesi şartı bulunmaktadır.
- Bu saydığımız basamakları başarıyla gerçekleştiren çözülmüş moleküllerin, adsorban madde ile fiziksel etkileşimlerle ilişmesi sonrasında adsorpsiyon sürecinin ilk etabı sonlanmış olur.

Adsorpsiyon prosesinin esas bileşimi adsorplanması gerçekleşecek olan molekülün çözücünden sıyrılabilme kapasitesi ve katıyla olan etkileşimi ile ilişkilendirilir.

Su ihtiva eden bileşenlerde bahsettiğimiz kapasite ve etkileşim unsurunun bileşimi ile bu unsurlarla bağlantılı olan tüm özellikler ve çözünme niteliği, adsorpsiyon prosesinin üzerinde özenle durulan kriterlerindedir (Gündoğdu, 2010).

## 2.8. Adsorpsiyon Türleri

Adsorplama işlemini gerçekleştiren katı yüzey tabakası ve adsorplanan molekülün etkileşimleriyle bağlantılı meydana gelen fiziksel, kimyasal ve iyonik olarak isimlendirilen üç farklı adsorpsiyon türü mevcuttur.

### 2.8.1. Fiziksel Adsorpsiyon

Adsorplanan molekülün adsorbanın yüzey tabakasına ilişmesi fiziksel ve kimyasal olarak meydana gelen çekim kuvvetleri ile ilişkilendirilir. Bu adsorpsiyon çeşidinde güçlü olmayan Van der Waals etkileşimleri gözlemlenmektedir. Fiziksel adsorpsiyonun karakteristiği özet olarak şu şekilde açıklanabilir:

- Proses çok katmanlı şekilde meydana gelmektedir.
- Moleküller hareket halindedir.
- Elektronların karşılıklı ilişkisi yahut ortak kullanımı söz konusu değildir.
- Reaksiyonun gerçekleşebilmesi adına aşılması şart olan aktivasyon enerjisine ihtiyaç duyulmamaktadır.
- Tersinir şekilde yürümektedir.
- Sıcaklık artışı adsorpsiyon hızını düşürücü yönde etkilemektedir.
- Proses esnasında  $2 \text{ kcal mol}^{-1}$  ile  $5 \text{ kcal mol}^{-1}$  arasında enerji açığa çıkmaktadır (Ay, 2019).
- Sıcaklığın düşük olduğu koşullarda da meydana gelme durumu söz konusudur.

### 2.8.2. Kimyasal Adsorpsiyon

Adsorplanan moleküllerin yüzey tabakasına tutunması güçlü bağlarla gerçekleşiyorsa adsorpsiyon prosesi kimyasal olarak meydana gelmektedir. Kimyasal adsorpsiyonda diğer adıyla kemisorpsiyonda kovalent bağların etkisi söz konusudur. Kimyasal adsorpsiyonun özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Proses tek katmanlı şekilde meydana gelmektedir.
- Moleküllerin hareketi söz konusu değildir.
- Elektronların karşılıklı etkileşimi mevcuttur.
- Reaksiyonun gerçekleşebilmesi için aktivasyon enerjisine gereksinim duyulmaktadır.
- Tersinmez şekilde yürümektedir.
- Sıcaklık artışı adsorpsiyon hızını yükseltici yönde etkilemektedir.
- Proses esnasında  $10 \text{ kcal mol}^{-1}$  ile  $50 \text{ kcal mol}^{-1}$  arasında enerji açığa çıkmaktadır (Ay, 2019).
- Sıcaklığın yüksek olduğu koşullarda da meydana gelme durumu söz konusudur.

### 2.8.3. İyonik Adsorpsiyon

Adsorbat ile yüzey tabakası arasındaki elektriksel etkileşimden kaynaklanmaktadır. Proses adsorban ile adsorbatın sahip olduğu iyonik kuvvetlerin etkisi hakimdir. Mevcut iyonlardan yükü yoğun bulunanlar ile çapı nispeten küçük olanların daha iyi adsorbe olduklarından söz edilmektedir.

Adsorpsiyon prosesini mevcut koşullara göre çeşitlendirmek ve prosesin tür ayrımını yapmak mümkün olsa dahi genel olarak süreci tek basamakta ve kesin çizgilerle ifade etmek kolay olmamaktadır. Adsorpsiyon prosesinin mevcut olduğu sistemlerde bahsetmiş olduğumuz üç tür (fiziksel, kimyasal ve iyonik adsorpsiyon) sıklıkla birlikte yahut peşi sıra gözlemlenmektedir (Öncel, 2015).

## 2.9. Adsorpsiyonu Etkileyen Faktörler

### 2.9.1. Adsorbanın Karakteristiği ve Miktarı

Adsorban seçimi prosesin verimli şekilde ilerleyebilmesi için önemli bir parametredir. Adsorpsiyon prosesinde kullanılacak olan adsorban maddenin şu özelliklere sahip olması istenir:

- Herhangi bir zehir içeriği bulunmaması,

- Su içerisinde çözünmemesi,
- Yapılan araştırmalar ve çalışmalar neticesinde uygulanabilirliğinin test edilmiş olması,
- Sahip olduğu yüzey alanı bakımından yüksek olması,
- Prosesin diğer önemli eşlikçisi olan adsorbatla etkileşim içinde olması,
- Temin edilebilmesi kolay olması (Gökara, 2013).

Adsorpsiyon prosesinde adsorbanın partikül boyutu da önem arz etmektedir. Partikül boyutu ufaltıldığı takdirde süreç yürütülürken birim adsorban başına adsorplanacak tanecik miktarı artış gösterecektir. Farklı kullanım alanlarına yönelik çeşitli ebatlarda adsorbanlar piyasada satışa sunulmaktadır.

Adsorbanın kimyevi niteliği de proseste üzerinde durulan diğer bir özelliktir. Bulunduğu pH aralığına göre adsorbatla olan etkileşimi farklılık gösterecektir.

Ayrıca adsorpsiyon prosesinde kullanılan adsorbanın miktarı da adsorpsiyona etki eden parametrelerdendir. Adsorban miktarındaki değişimle birlikte prosesin gerçekleşeceği alan da değişeceği için giderim verimi üzerinde etkisi bulunmaktadır (ncel, 2015).

### **2.9.2. Adsorbatın Karakteristiği ve Derişimi**

Adsorpsiyon prosesinden giderilmesi üzerine kurulu olan sistemde adsorbatın hangi özellikleri taşıdığı önemli hususlardandır. Organik yapıdaki moleküllerin sahip olduğu zincir uzunluğunun artmasıyla su içerisinde gerçekleştirdiği znmenin azalması dolayısıyla adsorpsiyonda artış gözlemlendiği ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Proseste yüksek znrlğe sahip yani suya karşı bağlanma seviyesi yüksek olan adsorbat ile çalışılıyorsa taneciklerin adsorbana karşı gösterdiği etkileşimin düşük seviyede olduğu bunun sonucunda zltide kalma durumunu korudukları bildirilmiştir. Böylelikle suya ilgi duyan moleküller ve suya karşı direnç gösteren moleküller karşılaştırıldığında, suya bağlanma gözetten taneciklerin daha az adsorplanacağı ileri srlmştir. Eğer bir molekülün bünyesinde çeşitli gruplar mevcut ise, adsorpsiyon işlemi molekülün suya direnç gösteren taneciklerinin u bölgesinden gerçekleşmektedir.

Adsorbatın tanecik yapısının hangi boyutta olduğu da verimli bir adsorpsiyon prosesi gerçekleştirmek adına üzerinde durulması gerekli parametrelerdendir. Etkin bir adsorban ve adsorbat etkileşimi için seçilen adsorbat adsorbana bütünüyle nüfuz edebilmeli bu doğrultuda adsorbatın tanecik boyutu uygun aralıkta seçilmelidir.

Adsorbata ait olan diğer önemli bir parametre ise molekülün iyona dönüşme sürecidir. Bu durum da adsorpsiyon prosesinin yürütülecek olduğu pH seviyesi ile doğrudan bağlantılıdır. Basit yapıdaki tanecik eğer nötr ise, iyon konumuna göre daha çok adsorplanma meydana gelmektedir. Eğer tanecik yapı olarak basit değilse, iyona dönüşme sürecinin ilk durumdaki gibi üzerinde durulması önem teşkil etmez.

Ayrıca adsorbat derişimi de adsorpsiyona etki eden faktörlerden biridir. Adsorbanın yüzeyi ile adsorbat arasındaki etkileşimin kuvveti yoğun olarak adsorbatın başlangıç derişimiyle ilişkilidir.

### **2.9.3. pH**

Asidite ve alkalinite değişkenleri endüstriyel bazlı atık suların kirliliğini gidermede arıtım verimini etkileyen önemli parametreler arasında yer almaktadır. Adsorpsiyon prosesinde çalışılan çözeltinin pH değeri adsorpsiyonun kapasitesini büyük ölçüde etkilemektedir. Çözeltideki proton ve hidrosil içerikli iyonların adsorpsiyonu güçlü ilerlediğinden farklı içerikli iyonlar adsorbe olurken mevcut çözeltinin hangi pH değerine sahip olduğu önemlidir.

### **2.9.4. Sıcaklık**

Prosesin yürütüldüğü şartlarda sıcaklık artışı söz konusu ise adsorbat ile adsorban arasında gerçekleşen etkileşimlerin artacağı, hareketsiz bölgelerin aktifleşeceği, adsorban taneciklerinin sahip olduğu gözeneklerin büyümesi ile tanecik içi difüzyon prosesinin daha işlevsel hale geldiği şartlar söz konusu olur. Sıcaklık değişimleri ile adsorban için denge kapasitesi farklılaşmaktadır.

Adsorpsiyon prosesinin ekzotermik veya endotermik olarak gerçekleşme durumuna göre aktivasyon enerjisiyle ilişkili olarak artan sıcaklık ile beraber boya giderim veriminde değişikliğe sebep olan diğer bir parametre de sıcaklıktır. Adsorpsiyon

prosesi ekzotermik özellikte ise sıcaklık düşüşü ile birlikte adsorpsiyon verimi artış gösterecektir. Adsorpsiyon sistemlerinde, reaksiyonlar çoğunlukla ekzotermik olarak gerçekleştiği için sıcaklık azaldığı takdirde adsorplama kapasitesinde artış gözlenmektedir.

### **2.9.5. Karıştırma Hızı**

Adsorpsiyon prosesinin sahip olduğu hız değeri sistemin karıştırma hızı ile ilişkilendirilerek film difüzyonu yahut partikül difüzyonu ile denetlenmektedir. Karıştırma hızının düşük seyrettiği koşullarda partikülü saran sıvı film tabakası daha kalın olacağı için film difüzyonunun hızı adsorpsiyonu sınırlayan parametredir. Etkili bir karıştırma söz konusu olursa film difüzyonunun hızı, hızı sınırlandıran faktöre yani tanecik difüzyon noktasına doğru artış gösterir. Kesikli proseslerde gözenek difüzyonunun meydana geldiği durumda karıştırma hızının yüksek olması sınırlayıcı parametredir (Öncel, 2015).

### **2.10. Adsorpsiyon İzotermi**

Adsorpsiyon izotermi, sabit sıcaklık ve pH değerinde adsorban üzerine adsorplanan madde miktarı ( $q_e$ , mg/g) ile çözelti içinde adsorplanmadan kalan maddenin derişimi ( $C_e$ , mg/L) arasındaki denge ilişkisi hakkında bilgi verir (Okumuş ve Doğan, 2019). Adsorbat tanecikleri ile adsorban yüzeyi arasında meydana gelen adsorpsiyon prosesinin doğası, en anlaşılır şekilde izoterm grafiklerinden yararlanılarak kavranabilir.

Adsorbat molekülleri ile yüzey arasında meydana gelen adsorpsiyon prosesi, yüzeyde toplanan adsorbat derişimi ile çözültide kalan adsorbat derişimi arasında etkin bir denge kuruluncaya kadar devam eder. Buradaki denge durumunda adsorbat moleküllerinin yüzeyine adsorplanma hızı ile desorplanma hızının birbirine eşitliği söz konusudur. Denge halinde adsorbanın yüzeyindeki derişimde de adsorbatın yüzeyindeki derişimde de herhangi bir değişme gerçekleşmez.

Ölçümlerin gerçekleştiği sabit sıcaklıkta, deneyler tamamlandığında elde edilen sonuçlardan çözültide bulunan adsorban konsantrasyonları adsorbat üzerinde bulunan adsorban konsantrasyonlarına karşı noktalanır. Deneysel veriler izoterm modellerinin denklemlerine uygulanarak grafiğe geçirilir. Böylelikle adsorpsiyon prosesinin hangi

izoterm modeline uyduğu tespit edilebilir. Verilerin doğrusal bir grafik ortaya çıkardığı, korelasyon katsayısı (regresyon sabiti) değeri R<sup>2</sup>'nin, 1'e matematiksel olarak en yakın olduğu değerleri içeren model, o izoterm için adsorpsiyon prosesinin en çok uyumlandığı izotermdir. Adsorpsiyon prosesinin aydınlatılmasında çok sayıda izoterm modeli kullanılmaktadır. Bu çalışmada yaygın olarak kullanılan Langmuir, Freundlich ve Temkin izoterm modellerinden yararlanılmıştır.

### 2.10.1. Langmuir İzotermi

Langmuir izoterm modeli, katı madde yüzeyinin bütününe çevreleyen adsorplanmış gaz halindeki fazın monomoleküler tabaka oluşturmasına sebep olur. Bu izoterm modelinden her derişim aralığı için faydalanılabilir. Langmuir izoterminin varsayımları şu şekilde özetlenebilir:

- Adsorban yüzeyinin elastiklik özelliği göstermesi yüzeye çarpıp adsorplanmadan geri dönmesini sağlar.
- Aktif merkezlerin hepsinin birbirine eşit enerjide olması adsorpsiyon yöntemiyle molekülü alma eğiliminin eşitliğini ortaya koyar.
- Yüzey homojendir.
- Tüm aktif merkezler en çok bir adet adsorplanacak molekülü bulundurabilir.
- Adsorpsiyon dengesi dinamik dengedir, herhangi bir zaman diliminde adsorplanan gaz miktarı, katı yüzeyinden ayrılan gaz miktarına eşit durumdadır.
- Adsorpsiyonun gerçekleşme hızı, madde miktarı ve katının örtülmemiş yüzeyi ile orantılıdır.
- Adsorplanmış tanecikler çözülmüş halde değildir, çözünme sağlanırsa teori genel hale getirilebilir ve ilerletilebilir (Sarıkaya, 2003).

Langmuir izotermi (2.1), (2.2) ve (2.3) denklemleri yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$q_e = \frac{q_m C_e K_L}{1 + C_e K_L} \quad (2.1)$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2.2)$$

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (2.3)$$

$q_e$ : Denge halindeki adsorbanın gramı başına adsorpladığı boyar madde miktarını (mg/g),

$q_m$ : Maksimum adsorpsiyon kapasitesini (mg/g),

$C_e$ : Boyar maddenin dengedeki konsantrasyonunu (mg/L),

$K_L$ : Langmuir sabitini (L/mg),

$R_L$ : Boyutsuz ayırma faktörünü,

$C_0$ : Başlangıçtaki boyar madde konsantrasyonunu (mg/L) belirtmektedir.

Denklem (2.2)'den faydalanarak  $C_e$ 'ye karşı  $C_e/q_e$  değerlerinin grafiğe dökülmesiyle eğiminden  $q_m$  değerinin, kayma noktasından da  $K_L$  değerinin hesabı yapılmıştır.

Denklem (2.3)'te  $R_L$  ile belirtilen boyutsuz ayırma faktörü, kullanılan adsorban ve adsorbatın adsorpsiyon prosesi için uygun bir seçim olup olmadığı hususunda fikir vermektedir. Boyutsuz ayırma faktörü için dört farklı durumdan söz edilmektedir:

- $R_L$  değeri 0 ile 1 aralığında ise adsorpsiyon uygundur.
- $R_L$  değerinin 1'den büyük olduğu durumda adsorpsiyon uygun değildir.
- $R_L$  değerinin 1'e eşit olması durumunda doğrusal adsorpsiyon söz konusudur.
- $R_L$  değerinin 0'a eşit olması durumunda prosesin tersinmez olduğundan bahsedilir (Kocabıyık, 2023).

### 2.10.2. Freundlich İzotermi

Freundlich izoterm modeli de Langmuir izoterm modeli gibi adsorpsiyon proseslerini tayin etmede sıklıkla kullanılmaktadır. Adsorpsiyonun Freundlich izotermine uyumu adsorbanın yüzey tabakasının heterojen oluşuna işaret etmektedir.

Denklem (2.4) ile belirtilen Freundlich izoterm modelinde, adsorpsiyon prosesi gerçekleşikten sonra adsorplanan taneciklerin yüzey tabakasında herhangi bir dağılıma yahut topaşma meydana getirmediği savı üzerine çalışılmıştır.

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2.4)$$

$q_e$ : Denge halindeki adsorbanın gramı başına adsorpladığı boyar madde miktarını (mg/g),

$K_F$ : Adsorpsiyon kapasitesi ile ilgili Freundlich sabitini,

$n$ : Adsorpsiyon şiddeti ile ilgili Freundlich sabitini,

$C_e$ : Boyar maddenin dengedeki konsantrasyonunu (mg/L) ifade etmektedir.

Denklem (2.4)'ten yararlanarak  $\ln C_e$ 'ye karşı  $\ln q_e$  grafiğe geçirilip eğim değerinden  $1/n$ , kayma noktasından ise  $\ln K_F$  elde edilmektedir.

$K_F$  ve  $n$  sabitlerinin adsorpsiyon prosesindeki mevcut bağların gücü ile bağlantılı olduğu ifade etmektedir. Freundlich izoterm modelinde,  $K_F$  ve  $1/n$  değerlerinin matematiksel olarak büyüklüğü adsorpsiyon kapasitesinin büyüklüğüne doğrudan etki etmektedir.  $n$  değerinin 1'den büyük olduğu durumlarda adsorpsiyonun elverişli olduğundan bahsedilmektedir (Çiçekçi ve ark., 2020).

### 2.10.3. Temkin İzotermi

Temkin izoterm modeli, bütün taneciklerin adsorpsiyon ısısında meydana gelen düşüşün, doğrusal biçimde oluştuğunu ileri sürmektedir. Böylelikle meydana gelen bağlanma enerjisinin de homojenliğini kabul etmektedir (Okumuş ve Doğan, 2019).

Bu modelin nispeten katı haldeki iyon içeren yüzey tabakalarında meydana gelen adsorpsiyon prosesleri ile uyum içinde olması, dış ve iç alanlardaki enerjilerin aynı olmamasından ileri gelmektedir (Uraz, 2015).

Temkin izoterm modeli (2.5), (2.6) ve (2.7) denklemleri yardımıyla izah edilmiştir (Okumuş ve Doğan, 2019).

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln K_T C_e \quad (2.5)$$

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln K_T + \frac{RT}{b} \ln C_e \quad (2.6)$$

$$q_e = B_T \ln K_T + B_T \ln C_e \quad (2.7)$$

$q_e$  : Denge halindeki adsorbanın gramı başına adsorpladığı boyar madde miktarı (mg/g)

R: İdeal gaz sabiti (8,314j/mol.K)

T: Ortam sıcaklığı (K)

$K_T$ : Temkin izoterm sabiti (L/g)

$B_T$ : Adsorpsiyon ısısı ile ilgili Temkin izoterm sabiti (j/mol)

Temkin izoterm modeli denklemlerinden yararlanarak  $\ln C_e$ 'ye karşı  $q_e$  grafiğe geçirilmiş, doğrunun eğim değerinden ve kayma noktasından  $B_T$  ve  $K_T$  izoterm sabitleri hesaplanmıştır.

## 2.11. Adsorpsiyon Kinetiği

Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen veriler ile kinetik modellerin uyumunu araştırmak, adsorban ile adsorbat etkileşimlerinin fiziksel veya kimyasal oluşu, adsorpsiyon prosesinin hızı ve modeli hakkında bilgiler sunmaktadır. Adsorpsiyon kinetiği araştırılarak adsorban ile adsorbat etkileşiminin temas süresi elde edilir. Adsorpsiyon süreci 4 temel aşamada gerçekleşebilir:

- Adsorbat tanecikleri gaz veya sıvı halde iken adsorbanı çevreleyen bir yüzey ile difüzyonu,
- Yüzeyle ulaşan adsorbatın adsorbanın gözeneklerine difüzyonu,
- Tanecik içi difüzyon ile isimlendirilen adsorbat maddenin adsorbanın gözeneklerinde hareketi sonucu adsorpsiyon prosesinin oluşacağı bölgelere difüzyonu,
- Adsorbat maddenin adsorban gözeneklerinde tutunma gerçekleştirilmesi (Özkılıç, 2019).

Adsorban maddenin mevcut durumu hareketsizken 1'inci aşama ile adsorpsiyonun hızı tespit edilir. Hareketlilik söz konusu olursa yüzeyin sahip olduğu tabaka inceleyeceği için prosesin hızının arttığı gözlemlenir. 4'üncü aşamanın sahip olduğu hız tespit edilemeyecek derecede yüksektir. 1'inci aşamada kararlı bir çalkalama sergilendiğinde hız 2'nci ve 3'üncü aşama ile tayin edilir. 2'nci aşama prosesin ilk

dakikalarında oluştuğundan, 3'üncü aşamanın oluşması ise zaman aldığından prosesin hızının bütünüyle 3'üncü aşama ile belirlenebileceği ileri sürülmüştür (Karaoğlu, 2007).

### 2.11.1. Yalancı Birinci Mertebe Hız Eşitliği

Adsorpsiyon prosesinde yüksek olmayan derişimler söz konusu olduğunda sıklıkla başvuru bir eşitlik. Bu modelde adsorpsiyonun kapasite artışının adsorpsiyon hızı ile ters orantılı olduğu ileri sürülmektedir. Denklem (2.8) ile ifade edilmiştir.

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2,303} t \quad (2.8)$$

$q_e$ : Denge anındaki adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)

$q_t$ : Herhangi bir t anındaki adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)

$k_1$ : Yalancı birinci mertebe hız sabiti ( $dk^{-1}$ )

Denklem (2.8)'den yararlanarak t'ye karşı  $\log(q_e - q_t)$  değerleri grafiğe geçirildiğinde eğim değeri ( $k_1/2,303$ ), kayma noktası da  $\log(q_e)$  olan bir doğruya erişilmektedir.

### 2.11.2. Yalancı İkinci Mertebe Hız Eşitliği

Yalancı ikinci mertebe kinetik modeli, adsorpsiyon proseslerinde kinetik incelemelerde yararlanılan modellerdendir. Yalancı birinci mertebe kinetik modelinden farklı olarak bu model hız kontrol basamağı ile bütünüyle uyum içinde ilerlemektedir (Gündoğdu, 2010). Yalancı ikinci mertebe kinetik modeli denklem (2.9) ile sunulmuştur.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 (q_e)^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.9)$$

$q_e$ : Denge anındaki adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)

$q_t$ : Herhangi bir t anındaki adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)

$k_2$ : Yalancı ikinci mertebe hız sabiti (g/mg.dk)

t'ye karşı t/q<sub>i</sub> değerleri grafiğe geçirildiğinde, eğim değeri q<sub>e</sub> değerini, kayma noktası ise yalancı ikinci mertebe hız sabitini vermektedir (Okumuş ve Doğan, 2019).

### 2.11.3. Aktivasyon Enerjisi

Bir tepkimenin başlayabilmesi için gereksinim duyulan enerjiye aktivasyon enerjisi denir. Denklem (2.10)'da belirtilen adsorpsiyon hız sabiti ve sıcaklık etkileşimi Arrhenius Eşitliği ile verilmiştir.

$$\ln k_2 = \ln k_0 - \frac{E_a}{R_g T} \quad (2.10)$$

k<sub>0</sub>: Arrhenius faktörü (g/mol.dk)

E<sub>a</sub>: Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)

R<sub>g</sub>: Gaz sabiti, 8,314 (j/mol.K)

T: Çözeltinin sıcaklığı, (°K)

ile belirtilmiştir (Abak, 2008). Bu eşitlikte lnk<sub>2</sub> değerleri 1/T değerlerine karşı grafiğe geçirildiğinde elde edilen doğrunun eğim ve kayma noktasından k<sub>0</sub> ve E<sub>a</sub> değerleri tayin edilebilir.

### 2.12. Adsorpsiyon Termodinamiği

Termodinamik kelime anlamı olarak sıcaklık değişimi anlamında kullanılmaktadır. Doğada meydana gelen her türlü reaksiyon esnasında bir enerjinin başka bir enerjiye dönüşmesinden bahsedilmektedir. Termodinamik farklı enerji çeşitleri arasındaki etkileşimleri incelemektedir (Peltek, 2012).

Termodinamik incelemelerde aralarında etkileşim bulunan maddeler sistem adıyla anılmaktadır. Bu sistemin dahil olduğu bir çevre mevcuttur. Sistem ve çevrenin oluşturduğu bütün ise evren adıyla isimlendirilmektedir. Fiziksel yakut kimyasal değişimler esnasında sistemin sahip olduğu enerji, entalpi, entropi ve serbest enerjiler gibi kavramlar, denge halindeki sistemler termodinamiğin çalışma konularındandır. Bir

değişimin meydana gelişi hakkında termodinamikten faydalanıp sahip olduğu mekanizma ve hız ile ilgili bilgilere kinetik incelemeler sonucunda ulaşabiliriz.

Bir molekülün bünyesinde topladığı enerjilerin bütünü entalpi adıyla isimlendirilir. Kimyasal reaksiyonlarda ürünlerin entalpi değerleri ile girenlerin entalpi değerleri arasındaki fark entalpi değişimi ile ifade edilmektedir ve  $\Delta H^\circ$  ile gösterilmektedir. Standart entalpi değişimi değerleri pozitif veya negatif olma durumlarına göre reaksiyon esnasındaki ısı alışverişleri hakkında bilgi vermektedir.

Termodinamik ifadelerden entropi ise fiziksel bir sistemin sahip olduğu düzensizlik göstergesidir ve  $\Delta S^\circ$  ile belirtilmektedir. Herhangi bir sistemin düzensizliği arttığında entropisi de artış göstermektedir. Adsorpsiyon proseslerinde maddede meydana gelen toplaşmalarla düzensizlik azalacağı için entropi de doğru orantılı olarak azalmaktadır.

Standart Gibbs serbest enerji değişimi adıyla isimlendirilen ve  $\Delta G^\circ$  ile gösterilen termodinamik terimi ise denge durumunu ve istemli olma halini tanımlamaktadır. Kendiliğinden oluşan durumlarda sistemin stabilitesini korumak adına entropi değerini maksimuma yükseltmek eğiliminde olduğu belirtilmektedir. Kendiliğinden oluşan kimyasal reaksiyonlarda serbest enerji düştüğü için  $\Delta G^\circ$  değeri negatif işaretlidir. Tersinir veya denge halindeki sistemlerde  $\Delta G^\circ$  değeri sıfıra eşittir. Serbest enerjinin artış gösterdiği durumlarda ise  $\Delta G^\circ$  değeri pozitif işaretli olacaktır. Bu durumda reaksiyon istemsiz olarak yürüyecektir (Peltek, 2012).

Standart Gibbs serbest enerji değişimi denklem (2.11) ile ifade edilmiştir.

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (2.11)$$

$\Delta G^\circ$ : Standart Gibbs serbest enerji değişimi (kJ/mol),

$\Delta H^\circ$ : Standart entalpi değişimi (kJ/mol),

$\Delta S^\circ$ : Standart entropi değişimi (kJ/mol K),

T: Mutlak sıcaklık (K),

R: İdeal gaz sabiti, 8,314 (j/mol K) ile gösterilmiştir.

Herhangi bir prosesin standart Gibbs serbest enerji değişimini hesaplamının ilk adımı denge sabitini ( $K_d$ ) tespit etmektir (Gündoğdu, 2010). Denge sabiti, denklem (2.12) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$K_d = \frac{C_a}{C_e} \quad (2.12)$$

$K_d$  : Adsorpsiyon denge sabiti

$C_a$  : Adsorbanın birim kütlesinde tutulan adsorbat konsantrasyonu (mg/L)

$C_e$  : Adsorpsiyon sonrası çözültideki adsorbat konsantrasyonu (mg/L)

Denklem (2.12)'den  $K_d$  hesaplanarak standart Gibbs serbest enerji değişimini bulmak için denklem (2.13)'te yerine konulur.

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_d \quad (2.13)$$

Denklem (2.14) ile sunulan Van't Hoff eşitliği yardımıyla da entalpi ve entropi değişim değerleri tespit edilmektedir.

$$\ln K_d = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (2.14)$$

Van't Hoff eşitliğinden faydalanarak  $1/T$ 'ye karşı  $\ln K_d$  değerleri grafiğe geçirildiğinde, eğim değerinden  $\Delta H^\circ$ , kayma noktasından ise  $\Delta S^\circ$  değeri elde edilmektedir.

Entalpi değişiminin işareti pozitif iken prosesin endotermik şekilde, negatif iken ise ekzotermik şekilde meydana geldiğine işaret etmektedir (Gündoğdu, 2010). Standart Gibbs serbest enerji değişiminin işaretinin negatif olduğu durumda ise proses kendiliğinden meydana gelmektedir. Entropi değişimi değerlerinin negatif olması proses gerçekleşirken çözültideki katı-sıvı arayüzeyinde düzensizliğin azaldığını göstermektedir (Erşan ve Düğenci, 2024).

### 3. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde adsorpsiyon prosesi ile ilgili gerçekleştirilmiş olan pek çok araştırma ve bilimsel faaliyet bulunmaktadır. Burada aktif karbon ve bentonit kili ile bağlantılı olan bazı çalışmalar şu şekilde paylaşılabilir:

Metilen mavisinin sulu çözeltilerden giderimi üzerine yapılan çalışmada yer fıstığı kabuklarının karbonizasyonu ile elde edilen aktif karbon kullanılmış, deneysel verilerin Freundlich izoterm modeli ile uygunluğu belirlenmiş, sıcaklık artışının adsorpsiyonu olumlu yönde etkilediği ve asidik ortam koşullarında giderim veriminin düşük olduğu ifade edilmiştir (Zorbay, 2010).

Salyangoz kabuğu atıklarından  $ZnCl_2$  ve  $CaCl_2$  kullanılarak üretilen aktif karbon ile metilen mavisi giderimi üzerine gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmasında, deneysel veriler Langmuir ve Freundlich izoterm modelleriyle aydınlatmaya çalışılmış, elde edilen sonuçlara göre Langmuir izoterminin korelasyon katsayıları sırasıyla  $CaCl_2$  ve  $ZnCl_2$  için sırasıyla 0,996 ve 0,957 bulunurken, Freundlich izotermi için sırasıyla 0,969 ve 0,962 bulunmuş, Langmuir izoterm sabiti  $R_L$  değerleri ise sırasıyla 0,75 ve 0,38 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre prosesin Langmuir izotermi ile uyumlu olduğu, salyangoz kabuğundan elde edilen aktif karbonun atık suların arıtılmasında kullanılabileceği belirtilmiştir (Gumus ve Okpeku, 2015).

Adsorban partikül boyutunun adsorpsiyon işlemi üzerindeki etkisini anlamak için granül, toz ve süper ince toz olarak 3 çeşit aktif karbon kullanılan çalışmada metilen mavisinin tekstil atık sularından giderilmesi konusunda adsorban karakterizasyonu, izoterm, kinetik ve termodinamik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. İzoterm ve kinetik analizler, her bir aktif karbona uygulanan izoterm ve kinetik modellerde farklılık olmadığını ancak daha küçük partikül boyutlarında izoterm ve kinetik katsayı değerlerinde artış olduğunu göstermiştir. Termodinamik incelemeler ise adsorpsiyon mekanizmalarının granül ve süper ince toz aktif karbon için elektrostatik etkileşim ile toz aktif karbon için ise Van der Waals kuvvetleri ile gerçekleştiğini ortaya çıkarmıştır (Musthofa ve ark., 2023).

İğde çekirdeğinden elde edilen aktif karbonun tekstil atık sularından metilen mavisinin uzaklaştırılmasındaki etkisini incelemeye yönelik çalışmada, sıcaklık artışı ile birlikte boyar madde adsorpsiyonunun da artış gösterdiği tespit edilmiştir. Optimal çalışma koşullarında pH 10,75 değerinde %99,83'lük boya giderim verimine ulaşılmıştır (Gökara, 2013).

Metilen mavisi boyar maddesinin sulu çözeltilerden giderilmesi amacıyla incir biyokütlesinden yararlanılan çalışmada elde edilen aktif karbonun adsorpsiyon süreci Langmuir, Freundlich ve Temkin izotermi ile ele alınmış, prosesin Langmuir ve Temkin izoterm modeli ile yalancı ikinci mertebe kinetik modeline uyum sağladığı ortaya konulmuştur (Pathania ve ark., 2017).

Nar kabuğu artıklarından potasyum hidroksit kullanılarak aktive edilen aktif karbon ile sulu çözeltilerden metilen mavisinin giderilmesine yönelik çalışmada meydana gelen sıcaklık artışı ile adsorpsiyon hızının artış gösterdiği tespit edilmiş ve daha bazik ortam koşullarında adsorpsiyon kapasitesinin de daha yüksek seyrettiği ifade edilmiştir (Yılmaz ve Alagöz, 2019).

Endüstri atık sularından boyar maddelerin uzaklaştırılması konusunda atık çaydan elde edilen aktif karbon ile metilen mavisi adsorpsiyonu üzerine çalışılmış, elde edilen veriler neticesinde maksimum giderim veriminin 25 °C sıcaklıkta ve pH 10,5 değerinde %99,60 ile sonuçlandığı rapor edilmiştir (Ustabaş, 2016).

Haşhaş kapsülü küspesinin aktivasyonu elde edilen aktif karbonun metilen mavisi giderimi adsorpsiyon tekniği ile farklı parametreler üzerinden değerlendirilmiş, çalışmanın bulguları prosesin Freundlich ve Langmuir izoterm modellerinden Langmuir izoterm modeli ile uyum içinde olduğunu ortaya koymuştur. Adsorpsiyon çalışmalarında %98,7 oranında boya giderim verimi tespit edilmiştir (Özusoğlu, 2022).

Adsorpsiyon metodu ile sulu çözeltilerden metilen mavisi giderimi konusunda hammadde olarak acı bakla bitkisinin tohumlarından elde edilen aktif karbondan faydalanılan çalışmada 2 ile 10 pH aralığında yapılan denemeler ile pH değeri arttıkça boya gideriminde artış gözlenmiş, en yüksek giderim verimine %98 ile pH 10 değerinde

ulaşmıştır. Proses 4 ayrı izoterm modeli ile aydınlatılarak en iyi uyum Langmuir izoterm modeli ile sağlanmıştır (Bağcı, 2014).

Potasyum hidroksit emdirilmiş toz aktif karbonun atık sulardaki metilen mavisini uzaklaştırmasına yönelik çalışmada adsorpsiyon verileri Langmuir izotermi ile iyi bir şekilde tanımlanmıştır. Başlangıç boya konsantrasyonunun ve pH değerinin artmasıyla giderim veriminin de artış sergilediği sonucuna ulaşılmıştır (Yasin ve ark., 2007).

Metilen mavisinin atık sudan uzaklaştırılmasının etkinliğini arttırmak için fosforik asit emdirilmiş mangosten meyvesi kabuklarını aktive ederek sentezlenen aktif karbon adsorbanı 871,49 mg/g gibi oldukça yüksek bir adsorpsiyon kapasitesi sergilemiş, diğer biyolojik atıklarla mukayese edildiğinde mangosten kabuğunun boyalar için yüksek adsorpsiyon kapasitesiyle aktif karbon sentezlenme potansiyeline sahip olduğu rapor edilmiştir (Zhang ve ark., 2021).

Macoré meyvesinin kabuklarından elde edilen aktif karbon ile metilen mavisinin sulu çözeltilerden giderilmesi amacıyla yapılan çalışmada %98 oranında verim elde edilmiş ve prosesin Langmuir ve Freundlich izotermi ile yalancı ikinci mertebe kinetik modele uyum gösterdiği belirtilmiştir (Aboua ve ark., 2015).

Tekstil atık sularında boya arıtımı üzerine gerçekleştirilen çalışmada hammadde olarak seçilen okalıptüs kalıntısı fosforik asitle zenginleştirilerek aktif karbon elde edilmiş, veriler ışığında adsorpsiyon süreci yalancı ikinci mertebe kinetik modeli ve Langmuir izoterm modeli ile uyum sağlamıştır. Metilen mavisinin adsorpsiyonu kendiliğinden ve ekzotermik şekilde gerçekleşmiştir (Han ve ark., 2020).

Siyah vişne çekirdeğinin fosforik asitle aktivasyonu sonucunda elde edilen aktif karbonla metilen mavisinin uzaklaştırılmasını konu edinen çalışmada, maksimum adsorpsiyon kapasitesi 321,75 mg/g olarak bulunmuş ve prosesin Langmuir izoterm modeli ile uyum içinde olduğu ileri sürülmüştür (Arana ve Mazzoco, 2010).

Sulu çözeltilerden bromfenol mavisi, alizarin kırmızısı, malahit yeşili gibi farklı boyar maddelerin giderilmesi üzerine yapılan çalışmada metilen mavisinin uzaklaştırılması aktif karbon adsorbanı ile adsorpsiyon tekniğinden yararlanılarak

aydınlatılmış olup tüm boyalar için yüksek sıcaklık ve pH şartlarında adsorpsiyonun düşüş gösterdiği aktarılmıştır (Iqbal ve Ashiq, 2007).

Ceviz kabuğunun  $ZnCl_2$  ile işlem görmesiyle aktive edilmiş aktif karbonun endüstri atık sularından metilen mavisi giderimindeki etkinliğini araştıran çalışmada, adsorpsiyon termodinamiği incelenmesiyle reaksiyonun endotermik ve tersinmez yürüdüğü, elde edilen kinetik bulgulardan ise yalancı ikinci merteye kinetik modeline uyum gösterdiği rapor edilmiştir. Prosesin Freundlich izotermine nazaran Langmuir ile daha çok uyum içinde olduğu belirtilmiştir. Farklı parametrelerle aydınlatılan süreçte sıcaklık artışının gerçekleştiği koşullarda boya giderim veriminin de yükseldiği gözlemlenmiştir (Altundal, 2021).

Cezayir bölgesinden temin edilen bentonit, asitle aktifleştirilerek sulu çözeltilerdeki metilen mavisi giderimi üzerine etkileri farklı parametreler ile incelenmiş, pH 10 değerinde %91,65 giderim verimine ulaşılmış, adsorpsiyon hızının pH değeri arttıkça yukarı yönlü seyir gösterdiği ifade edilmiştir (Bellir ve ark., 2010).

Kesikli sistem üzerinde gerçekleştirilen adsorpsiyon prosesi doğal kil minerali ile atık sulardan metilen mavisi giderimi konusunda denenmiş, maksimum adsorpsiyon kapasitesi 25 °C'de 338,15 mg/g olarak raporlanmıştır (Bayar, 2018).

Doğal kil mineralinin sulu çözeltilerden boyar maddeleri uzaklaştırmasına yönelik adsorpsiyon çalışmasında metilen mavisi, kongo kırmızısı ve malahit yeşili ile denemeler yapılmış, pH değerindeki farklılığın giderim veriminin üzerinde önemli bir değişime yol açmadığı, prosesin katyonik boyalarla endotermik, anyonik boyalarla ekzotermik şekilde ilerlediği, termodinamik veriler ışığında ise kendiliğinden meydana gelmediği tespit edilmiştir (Çufadar, 2020).

Metilen mavisinin su ortamından arındırılması amacıyla Irak bölgesinden edinilen doğal bentonit kilinin fizibilitesi araştırılmış, seçilen bentonitin metilen mavisi adsorpsiyonu için yeterli özelliklere sahip olduğu, katyonların adsorpsiyonu desteklediği ortaya çıkarılmıştır. Maksimum adsorpsiyon kapasitesinin 303 °K'de 256 mg/g olduğu hesaplanmış, optimum pH değeri 5,6 olarak belirlenmiş, proses yalancı ikinci merteye kinetik model ile iyi bir şekilde tanımlanmıştır (Jawad ve ark., 2023).

Kars ilinden temin edilen doğal kil mineralinin sulu çözeltilerden metilen mavisi giderimindeki etkinliğini araştırmak amacıyla yapılan çalışmada boyar maddenin %98,6'lık bölümü giderilmiş, optimum sıcaklık 20 C olarak belirlenmiştir (Kavcı, 2022).

Adsorpsiyon tekniğinden yararlanarak yüzey aktif madde ile modifiye edilmiş bentonitin sulu çözeltilerden bazik boyları uzaklaştırması üzerine yapılan çalışmada metilen mavisi, kristal viyole ve rodamin B gibi boylarla çalışılmış; metilen mavisinin gideriminde %99,99 verim elde edilmiş, maksimum boya emilimine pH 9 değerinde ulaşıldığı rapor edilmiştir (Anirudhan ve Ramachandran, 2015).

Metilen mavisinin sulu çözeltilerden nikel oksit ile modifiye edilmiş Cezayir bölgesine ait montmorillonit kullanılarak giderilmesi, ticari bentonitle karşılaştırılarak incelenmiş, metilen mavisinin adsorpsiyonu için optimum sıcaklık 25 C'de, modifiyeli montmorillonite ait pH değer için zeltinin doğal pH değer için olan 5,8; ticari bentonite ait olan pH değer için ise 6,3 olarak tespit edilmiş, her iki adsorban için metilen mavisi adsorpsiyonunun fiziksel, kendiliğinden ve ekzotermik şekilde gerçekleştiği bildirilmiştir (Boukhatem ve ark., 2023).

Çinkonun sulu çözeltilerden bentonit kullanılarak giderimi konulu çalışmada Balıkesir bölgesinden temin edilen doğal ve sodyum ile zenginleştirilmiş bentonit adsorpsiyon özellikleri açısından karşılaştırılmış, sodyum ile zenginleştirilmiş bentonitin tüm süreçte doğal bentonitten daha iyi performans sergilediği, deneysel verilerin Langmuir ve Freundlich izoterm modellerine uyumlandığı tespit edilmiştir (Kaya ve ren, 2005).

Fas bölgesinden edinilen doğal kil ile gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmasında metilen mavisi, kristal viyole ve kongo kırmızısı boyar maddeleri ile denemeler yapılmış, prosesin Langmuir modeli ile daha iyi tanımlanabileceği, yalancı ikinci mertebe kinetik modeli ile uyum sağladığı belirtilmiştir (Bentahar ve ark., 2017).

Sulu çözeltilerden metilen mavisi giderimi üzerine yapılan çalışmada Tirebolu yöresinden temin edilen bentonit ile adsorpsiyon tekniğinden yararlanarak deneyler yapılmış, elde edilen verilere göre pH değerlerindeki değişikliğin adsorpsiyon kapasitesi

üzerinde herhangi bir değişime yol açmadığı, prosesin ekzotermik şekilde yürüdüğü ve maksimum adsorpsiyon kapasitesinin 345,5 mg/g olarak tespit edildiği açıklanmıştır (Akçay, 2018).

Metilen mavisi boyar maddesi ile çinko ağır metalinin kil minerali üzerindeki adsorpsiyon mekanizmalarını incelemek üzere Fas bölgesinden temin edilen bentonit ham şekilde ve asitle aktifleştirilerek denenmiş, bentonitin asitle aktivasyonunun metilen mavisi ve çinko iyonlarının maksimum alımını %30 ve %95 oranında azalttığı, uygun izoterm modellerinin metilen mavisi ve çinko için sırasıyla Freundlich ve Dubinin-Radushkevich olduğu rapor edilmiştir (Hajjaji ve El Arfaoui, 2009).

Afyon bölgesinden edinilen doğal kil mineralinin metilen mavisi adsorpsiyonu üzerine etkinliğini araştıran çalışmada prosesin pH değişimlerinden etkilenmediği, hem Langmuir hem de Freundlich izotermi ile iyi bir şekilde tanımlandığı, yalancı ikinci mertebe kinetik modeli ile uyum içinde olduğu tespit edilmiştir (Şentürk ve ark., 2011).

Metilen mavisinin sulu çözeltilerden gideriminde Fas bölgesinden edinilen bentonitin karakterizasyonu incelemesinde minerolojik içerik kalsiyum bentonitinin baskınlığını ortaya çıkarmış, yüksek plastisitesine rağmen çok yüksek su tutma becerisine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca katyon değişim kapasitesinin yüksek değerleri, bentonitin montmorillonit açısından zengin olduğunu ispat etmiş, bunun da daha iyi bir adsorplama kapasitesi sağladığını göstermiştir. Denge verileri en iyi Freundlich izotermi ile tanımlanmış, prosesin ekzotermik gerçekleştiği belirlenmiştir (Hmeid ve ark., 2021).

Irak bölgesinden temin edilen bentonit kili üzerine metilen mavisi adsorpsiyonunun kinetik ve termodinamik incelemesinde proses Langmuir ve Freundlich izotermi kullanılarak aydınlatılmış, deneysel veriler Langmuir izoterm modelinin 0,998 korelasyon katsayısı değeri ile daha uyumlu olduğunu ortaya çıkarmış, standart Gibbs serbest enerji değişimi ve entalpi değişimi değerlerinin negatif bulunması ile sürecin ekzotermik ve spontan yürüdüğünü göstermiştir. Deneyler 25 °C ile 40 °C aralığında gerçekleştirilmiş, maksimum giderime 25 °C'de %99,39 ile ulaşılmıştır (İbrahim ve ark., 2023).

## **4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **4.1. Materyal ve Metod**

Çalışmanın bu kısmında bentonit ve toz aktif karbondan yararlanılarak adsorpsiyon tekniği ile boyar madde olan metilen mavisinin uzaklaştırma yöntemi üzerine çalışılmıştır.

#### **4.1.1. Kullanılan Malzemeler ve Kimyasal Maddeler**

Adsorpsiyon prosesi çalışmalarında adsorban olarak kullanılan bentonit Ordu ilinden temin edilmiştir. Toz aktif karbon Carlo Erba firması ürünüdür. pH ayarlamasında kullanılan HCl ve NaOH kimyasalları, boyar madde olarak kullanılan metilen mavisi analitik saflıkta olup Merck firması ürünüdür.

#### **4.1.2. Kullanılan Cihazlar**

Adsorpsiyon çalışmaları yürütülürken Perkin Elmer Lambda 365 Model UV-Vis spektrofotometre kullanılmıştır. Çözeltilerin pH değerleri Thermo Fisher Scientific Eutech Ph 450 pH metre ile ölçülmüştür. Numunelerin tartım işlemleri Sartorius GL-224-1S analitik terazi ile gerçekleştirilmiştir. Karıştırma hızı ve sıcaklık parametrelerini içeren deneylerde Daihan Scientific ısıtıcılı çalkalayıcı ile çalışılmıştır. Çözelti hazırlama esnasında Isolab manyetik karıştırıcıdan faydalanılmıştır. Cam malzemelerin temizliği sonrasında gerçekleştirilen kurutma işlemi sırasında Nüve marka FN 400P model etüv kullanılmıştır. Santrifüj işlemi NÜVE NF 200 santrifüj cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Tüm çalışma boyunca saf su ihtiyacı Heal Force Smart N-15 VF ultra saf su cihazı ile karşılanmıştır.

#### **4.1.3. Metod**

Adsorpsiyon denemeleri için öncelikle metilen mavisi boyar madde stok çözeltisi 2,5 mg/L hazırlanmıştır. Denemelerde metilen mavisi çözeltisinin hacmi 50 ml olarak kullanılmıştır. 250 ml'lik cam erlenlerde çalışılmıştır. Çözeltilerin pH değeri 0,1 M HCl ve 0,1 M NaOH çözeltileri ile ayarlanmıştır. Çalkalamalı su banyosunda istenen sıcaklık değerine ulaştırılarak termal dengeye getirilmiştir. Mevcut çözeltilere tartımı

gerçekleştirilen bentonit ve toz aktif karbon ilave edilmiştir. Farklı karıştırma hızlarında çalkalanarak karıştırılmıştır. Bekleme sürelerinin sonunda 60 sn. askıda kalan kil ve toz aktif karbonun çökmesini sağlamak amacıyla 4500 rpm karıştırma hızı, 6 dk. süre ile iki defa santrifüj işlemi uygulanmıştır. Uygun oranlarda seyreltilerek çözeltilerde adsorplanmadan kalan madde miktarı UV-Vis spektrofotometre ile belirlenmiştir. Spektrofotometrik ölçümler 660 nm dalga boyunda absorbans bandında yapılmıştır. Her bir deney için metilen mavisi çözeltilerinin her iki adsorpsiyon prosesinde gerçekleşen giderim verimleri ile adsorpsiyon kapasiteleri değişen pH, sıcaklık, adsorbent konsantrasyonu, adsorban miktarı ve karıştırma hızı parametrelerinde (4.1) ve (4.2) denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır.

$$q_e = (C_0 - C_e) \times \frac{V}{W} \quad (4.1)$$

$$\% \text{ Giderim} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (4.2)$$

$q_e$ , dengedeki bentonit ve toz aktif karbon yüzeylerinde adsorplanmış metilen mavisi miktarı (mg/g),  $C_0$  ve  $C_e$ , adsorpsiyondan önce ve sonra çözeltide kalan metilen mavisi miktarı (mg/L),  $V$ , kullanılan metilen mavisi çözeltilisinin hacmi (L),  $W$ , bentonit ve toz aktif karbonun gram miktarıdır.

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

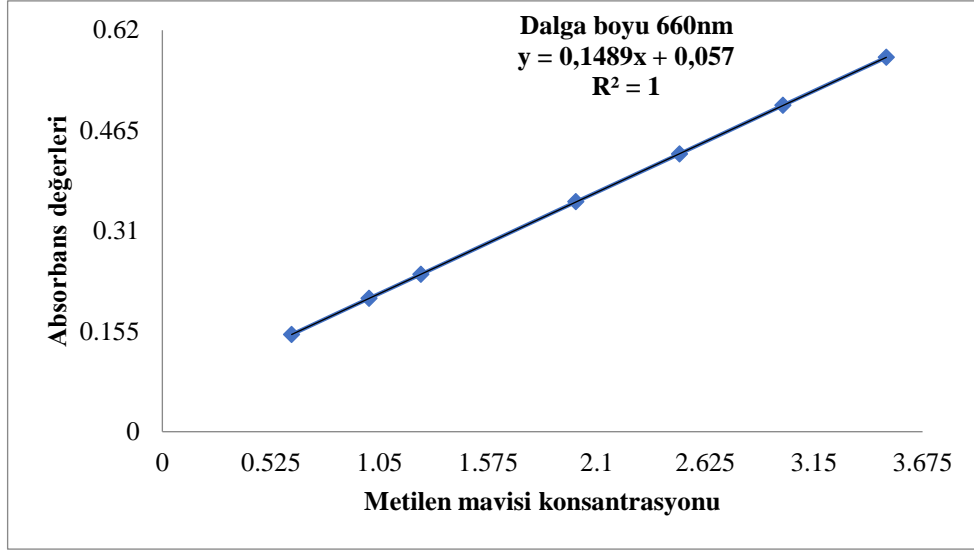
### 5.1. Adsorpsiyon Çalışmaları

660 nm dalga boyunda bulunan absorbands bandı ile tüm ölçümler gerçekleştirilmiştir. Spektrofotometrede 660 nm’de yapılan okumalar ile tüm numunelerin Çizelge 5.1 ile sunulan absorbands değerleri kaydedilmiştir.

**Çizelge 5.1.** Farklı konsantrasyonlardaki metilen mavisinin 660 nm’de ölçülen absorbands değerleri

Metilen Mavisi Konsantrasyonu (mg/L)	660 nm’de Ölçülen Absorbans Değerleri
0	0
0,625	0,150
1,0	0,206
1,25	0,243
2,0	0,355
2,5	0,429
3,0	0,504
3,5	0,578

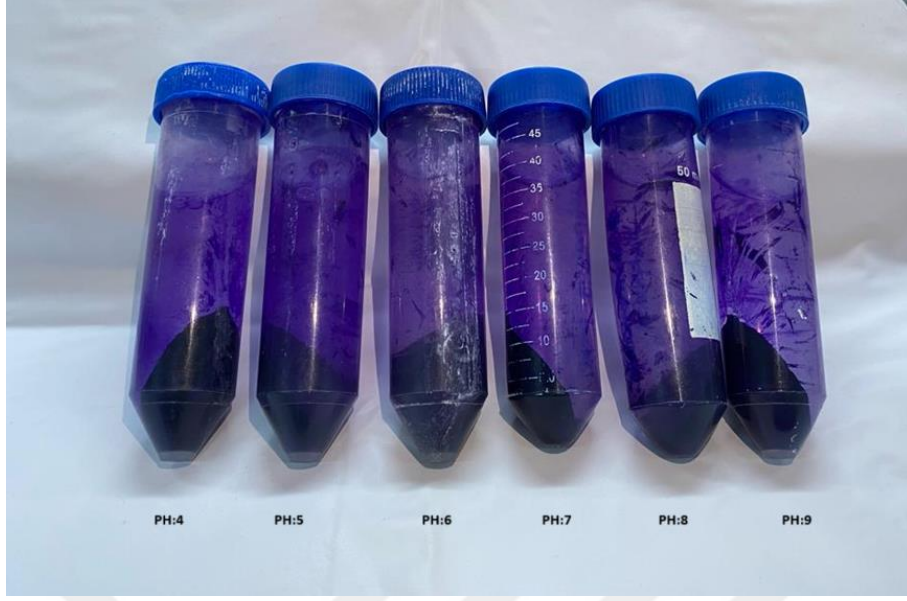
Standart metilen mavisini çözeltilerinin konsantrasyonları ve absorbands değerleri ile grafik hazırlanarak standart eğri oluşturulmuştur. Elde edilen standart eğri Şekil 5.1’de verilmiştir.



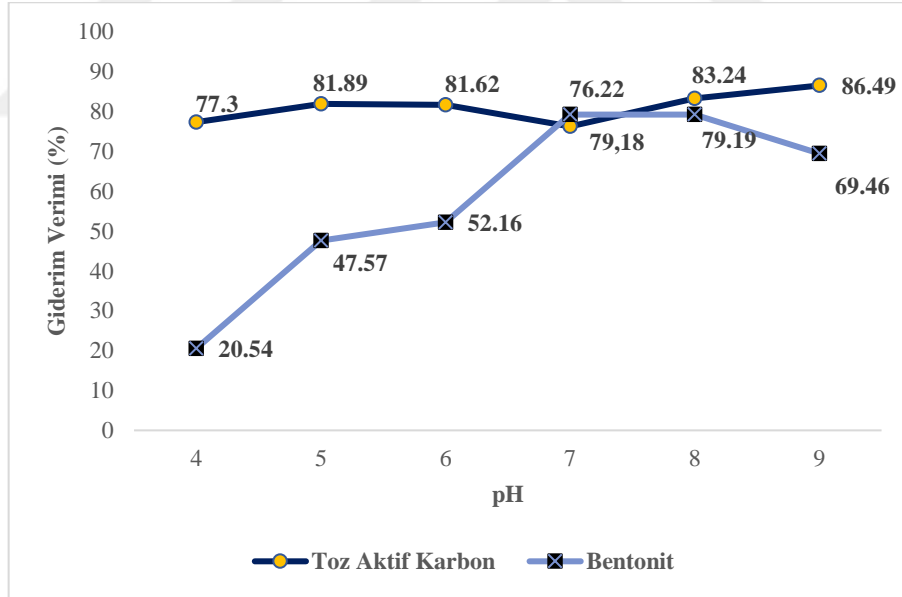
Şekil 5.1. Metilen mavisine ait standart eğri

## 5.2. Çözelti pH'sının Etkisi

Bu çalışmada pH aralığı 4-9 olarak seçilmiş ve denemeler bu değişken aralıkta gerçekleştirilmiştir. pH'nın etkisi belirlenirken 400 mg/100 mL toz aktif karbon ile bentonit 2,5 mg/100 mL metilen mavisi üzerine kullanılmıştır. Bekleme sürelerinin sonunda 60 sn. askıda kalan toz aktif karbon ve bentonitin çökmesi için santrifüj işlemi uygulanmıştır. pH'nın artmasıyla adsorbanların yüzeyi daha negatif yüklü hale gelip pozitif yüklü boya katyonları ile negatif yüklü adsorpsiyon bölgeleri arasındaki elektrostatik çekim kuvvetlerinin artmasına ve bu da boya adsorpsiyonunda artışa yol açmıştır (Müjde ve Özer, 2003). Benzer sonuç (Jin ve ark., 2008) tarafından yapılan kil üzerine metilen mavisi adsorpsiyonunda da gözlenmiştir. Aynı şekilde (Doğan ve ark., 2004) tarafından yapılan perlit ile metilen mavisi giderimi çalışmasında pH 3-11 aralığında çalışılmış ve pH değeri arttıkça metilen mavisinin adsorpsiyonu da artış göstermiştir. Bu çalışmada elde edilen deney sonuçlarına göre maksimum absorbansın gerçekleştiği pH değerleri toz aktif karbon için pH 9, bentonit için pH 8 olarak belirlenmiştir. Yapılan pH çalışmaları Resim 5.1 ve Şekil 5.2 ile sunulmuştur.



Resim 5.1. Uygun pH'nın belirlenmesi



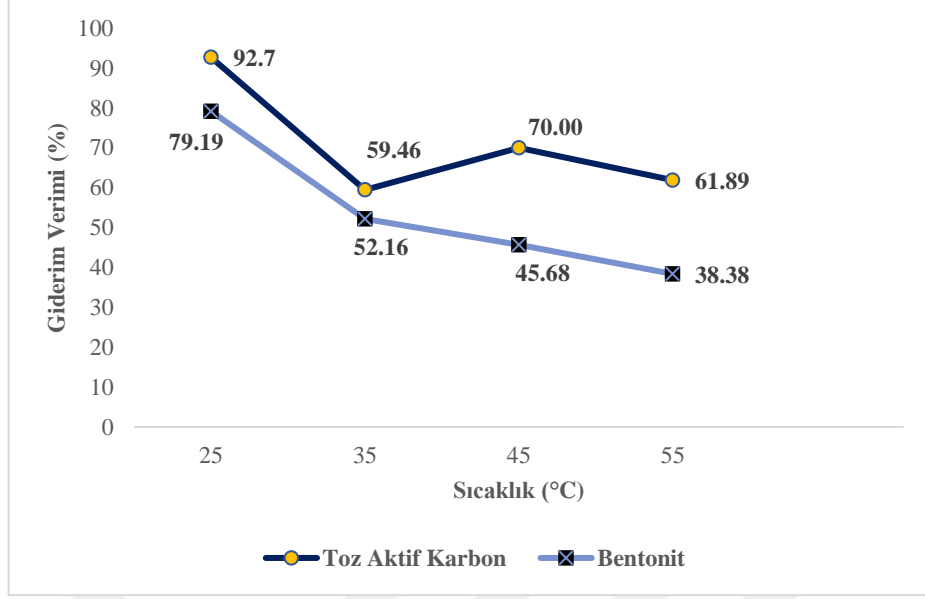
Şekil 5.2. Adsorpsiyon üzerine çözelti pH'sının etkisi

### 5.3. Sıcaklık Etkisi

Denemeler 25 °C, 35 °C, 45 °C ve 55 °C sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Boya giderimi açısından verimliliğin en etkin olduğu sıcaklık belirlenmeye çalışılmıştır. Hem toz aktif karbon hem de bentonit için uygun sıcaklık 25 °C olarak tespit edilmiştir. Sıcaklık artışı ile adsorpsiyon kapasitesinde meydana gelen düşüşün prosesin ekzotermik şekilde gerçekleştiğine işaret ettiğini söyleyebiliriz (İlçi, 2017). Bu durum bize sıcaklığın artış göstermesi ile adsorbanların yapısının değiştiğini ya da prosesin genelinde iyon değişimlerinin sıcaklığın yüksek olduğu koşullarda daha az gerçekleştiğini göstermektedir. Fiziksel adsorpsiyonda da sıcaklık artışıyla adsorpsiyon miktarı azalmaktadır (Zhou ve Banks, 1993). Sıcaklık parametresini içeren çalışmalar Resim 5.2 ve Şekil 5.3 ile gösterilmiştir.



**Resim 5.2.** Sıcaklığın etkisi



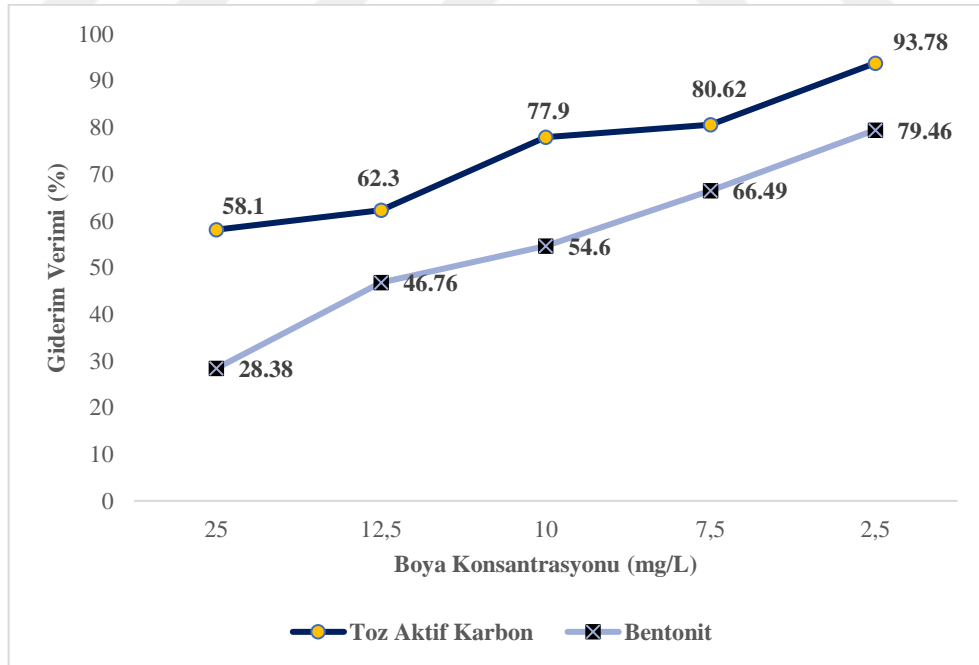
Şekil 5.3. Adsorpsiyon üzerine sıcaklığın etkisi

#### 5.4. Boya Konsantrasyonunun Etkisi

Metilen mavisi çözeltilerinin 2,5-25 mg/L değer aralığındaki derişimlerinde denemeler yapılarak giderim verimleri hesaplanmıştır. Hem aktif karbonun hem de bentonitin yüzey aktif bölgelerinin doygunluğa ulaşması dolayısıyla metilen mavisi konsantrasyonu arttıkça giderim veriminde düşüş gözlenmiştir (Duran ve ark., 2009). Düşük konsantrasyonlu metilen mavisi çözeltilerinde toz aktif karbon ve bentonit yüzeylerindeki aktif merkezlerin çözeltideki boya moleküllerine oranı fazla olacağı için, yüksek konsantrasyonlu boya çözeltilerine kıyasla daha fazla giderim ile sonuçlanmıştır. Adsorpsiyon prosesinin boyar madde konsantrasyonu ile ilgili çalışmaları Resim 5.3 ve Şekil 5.4 ile sunulmuştur.



Resim 5.3. Boya konsantrasyonunun etkisi



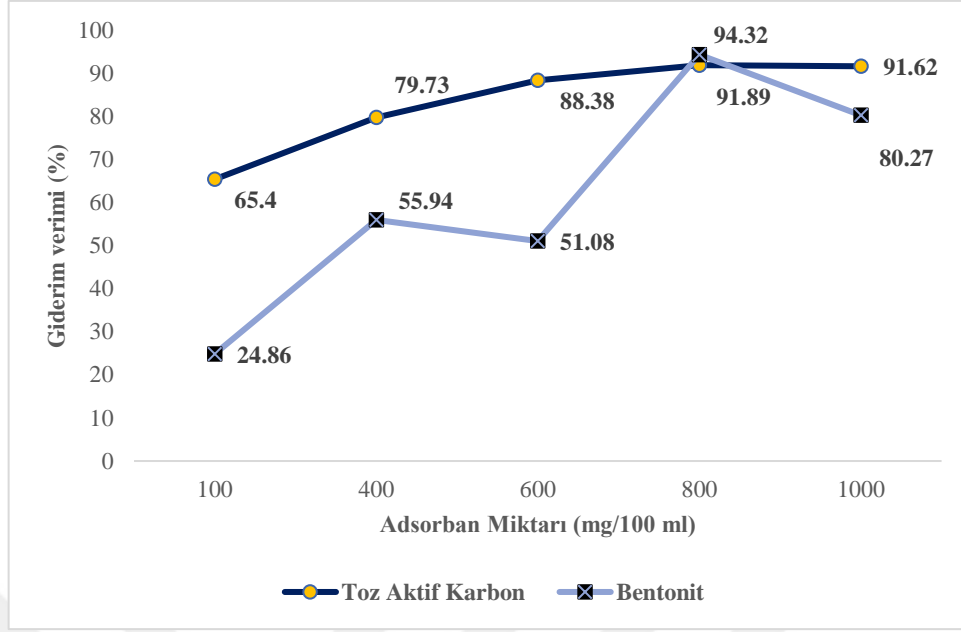
Şekil 5.4. Adsorpsiyon üzerine boya konsantrasyonunun etkisi

## 5.5. Adsorban Miktarının Etkisi

100-1000 mg/100 ml aralığında değişen konsantrasyonlara sahip toz aktif karbon ve bentonit çözeltilerinde adsorban miktarının değişiminin giderim verimi üzerine etkisi incelenmiştir. Adsorban dozajı 800 mg/100 ml'ye çıkarıldığında metilen mavisi giderim verimi toz aktif karbonda %91,89'a bentonitte ise %94,32'ye yükselmiştir. Metilen mavisi giderim verimindeki bu artış, toz aktif karbon ve bentonit yüzey alanlarındaki yükselmeye ilişkili olarak metilen mavisinin adsorbe olacağı uygun bölge sayısının artışı sebebiyledir (Mergen, 2018). Adsorban miktarının 800 mg/100 ml'den daha yüksek değerleri için ise giderim verimi düşüş göstermektedir. Buradaki düşüşün aglomerasyon sonucu adsorbanların dış yüzey alanının azalmasının neticesinde meydana geldiği düşünölmektedir (Benaisa ve ark., 2018). Literatürdeki bazı çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Shokoohi ve ark., 2010). Elde edilen veriler neticesinde toz aktif karbon ve bentonit için 800 mg/100 ml adsorban konsantrasyonu optimum değer olarak belirlenmiş ve devam eden çalışmalar boyunca adsorban konsantrasyonu olarak baz alınmıştır. Resim 5.4 ve Şekil 5.5 ile adsorban miktarını içeren deneylerden görseller paylaşılmıştır.



**Resim 5.4.** Adsorban miktarının belirlenmesi

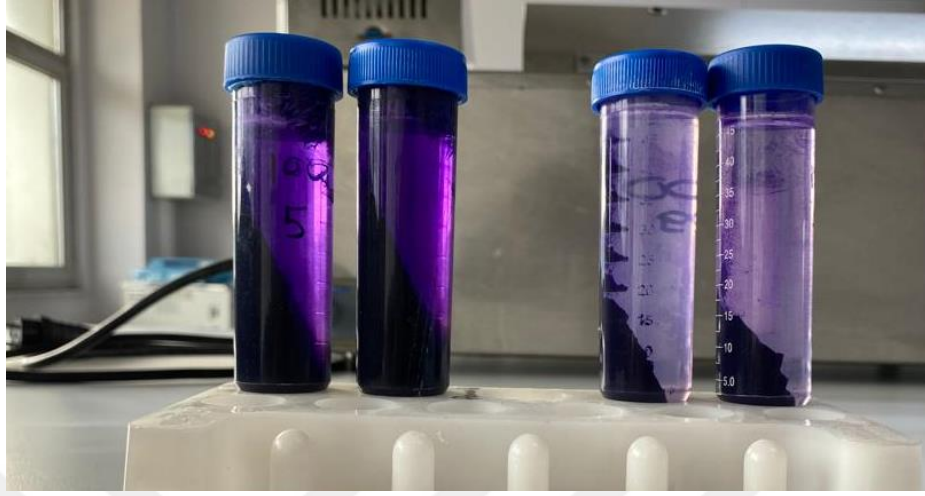


**Şekil 5.5.** Adsorpsiyon üzerine adsorban miktarının etkisi

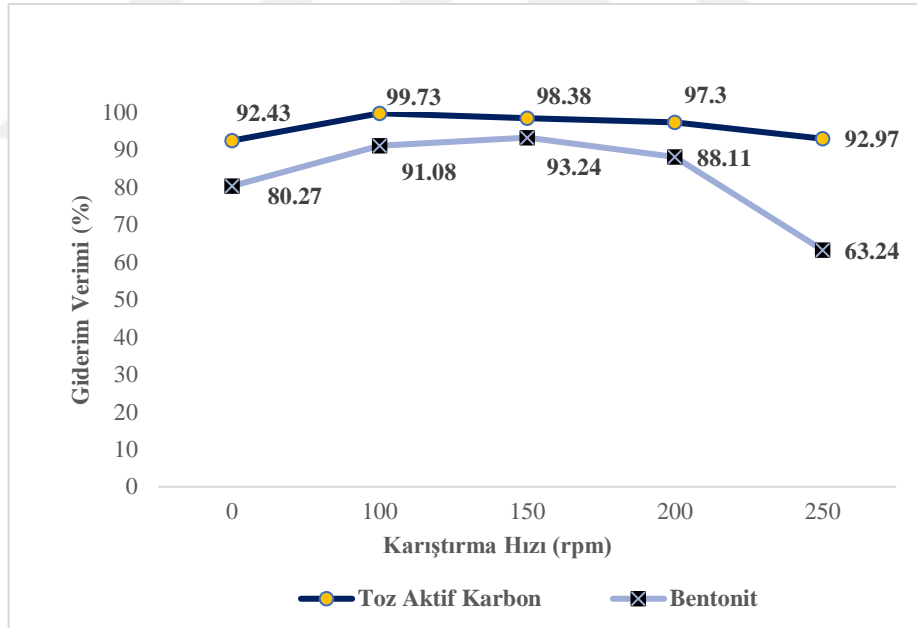
### 5.6. Karıştırma Hızının Etkisi

Adsorpsiyon çalışmaları  $0-250 \text{ dev dk}^{-1}$  değer aralığında beş farklı karıştırma hızı denenerek gerçekleştirilmiştir. Dene sonuçları incelendiğinde, karıştırma hızının artırılması ile boya giderim veriminde önemli bir değişim kaydedilmediği sonucuna varılmıştır. Literatürde de benzer çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir (Crini ve ark., 2007; Sözüdoğru ve ark., 2016). Bu durum belirli optimum karıştırma hızlarından sonraki yüksek karıştırma hızlarında toz aktif karbon ve bentonit ile metilen mavisi iyonları arasında, kırılabilen zayıf Van der Waals etkileşimlerinin meydana gelmesi ve aynı zamanda yüksek karıştırma hızlarında (toz aktif karbon için  $v > 100 \text{ dev/dk}$ , bentonit için  $v > 150 \text{ dev/dk}$ ) görülen desorpsiyon etkisi neticesinde toz aktif karbon ve bentonit ile metilen mavisi arasında meydana gelen adsorpsiyonun tersinir hale bürünmesi (Levankumar ve ark., 2009) ve sonuç olarak boya giderim veriminde azalmaya neden olması şeklinde açıklanabilir. Bu çalışma için, adsorpsiyon üzerine karıştırma hızının etkisi incelendiğinde dene sonuçlarına göre adsorban olarak toz aktif karbon kullanıldığında optimum karıştırma hızı  $100 \text{ dev/dk}$  iken, bentonit kullanıldığında  $150$

dev/dk olarak belirlenmiştir. Karıştırma hızının etkisinin incelendiği deneyler Resim 5.5 ve Şekil 5.6 ile sunulmuştur.



**Resim 5.5.** Uygun karıştırma hızının belirlenmesi

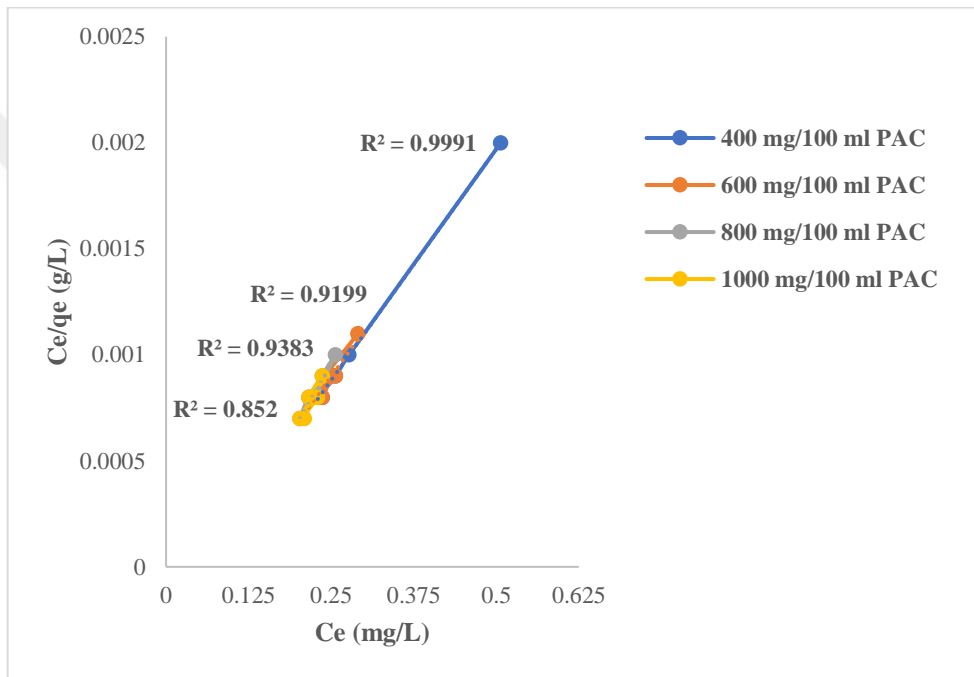


**Şekil 5.6.** Adsorpsiyon üzerine karıştırma hızının etkisi

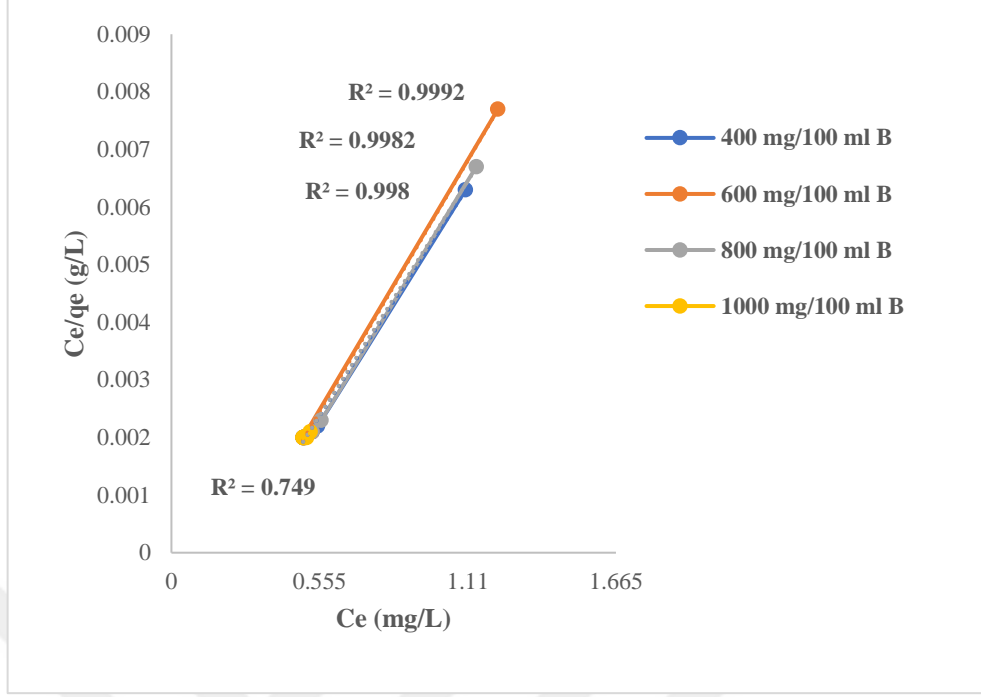
## 5.7. Adsorpsiyon İzotermi

Adsorpsiyon prosesinin aydınlatılmasında çok sayıda izoterm modeli kullanılmaktadır. Bu çalışmada toz aktif karbon ve bentonit üzerine metilen mavisi adsorpsiyonu incelenirken yaygın olarak kullanılan Langmuir, Freundlich ve Temkin izoterm modellerinden yararlanılmıştır.

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 ile sırasıyla toz aktif karbon ve bentonit için Langmuir izoterm eşitliğinden elde edilen korelasyon katsayıları sunulmuştur.

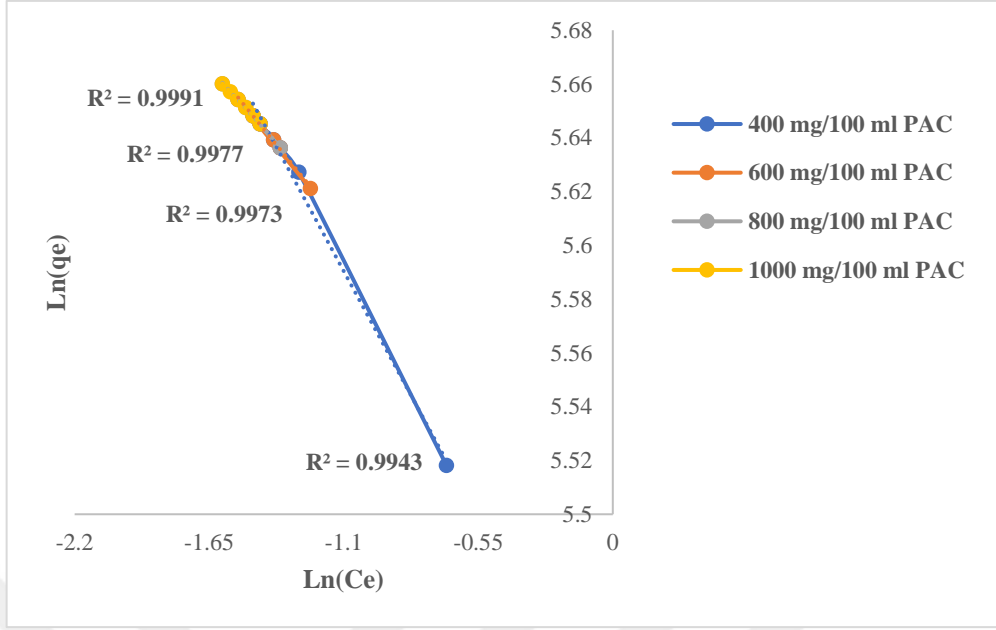


Şekil 5.7. Farklı toz aktif karbon konsantrasyonlarında metilen mavisi adsorpsiyonuna ait Langmuir izotermi

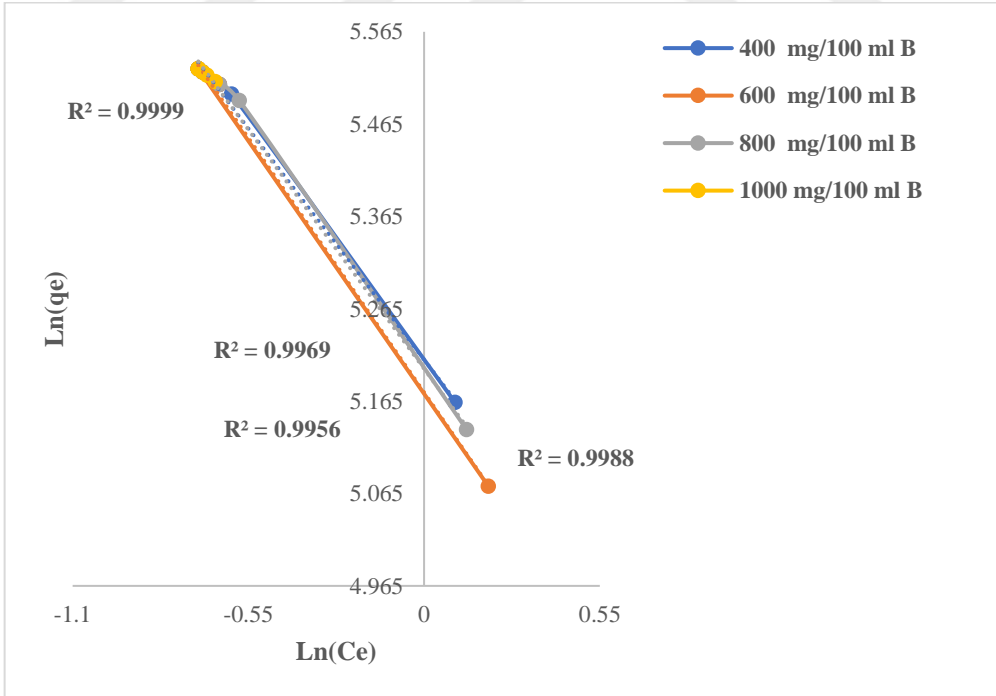


**Şekil 5.8.** Farklı bentonit konsantrasyonlarında metilen mavisi adsorpsiyonuna ait Langmuir izotermi

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 ile sırasıyla toz aktif karbon ve bentonit için Freundlich izoterm eşitliğinden elde edilen korelasyon katsayıları görülmektedir.

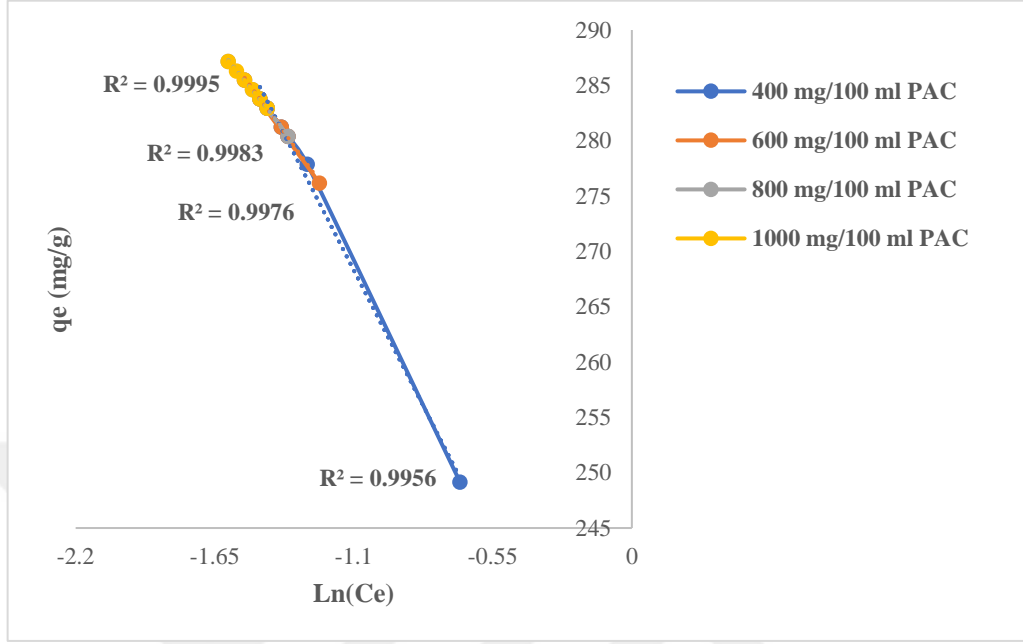


**Şekil 5.9.** Farklı toz aktif karbon konsantrasyonlarında metilen mavisi adsorpsiyonuna ait Freundlich izotermi

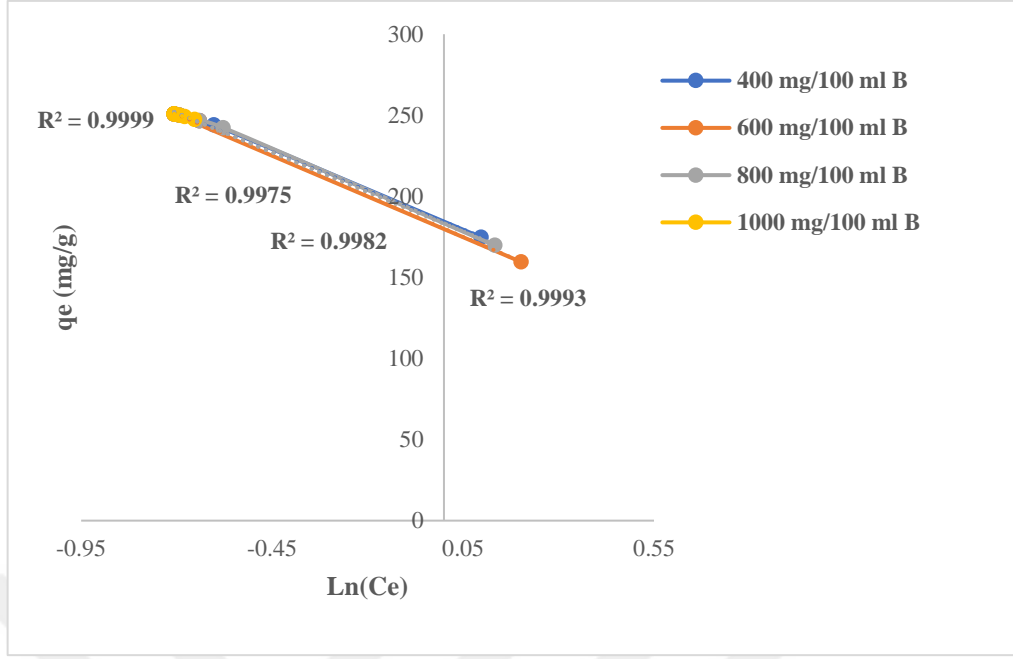


**Şekil 5.10.** Farklı bentonit konsantrasyonlarında metilen mavisi adsorpsiyonuna ait Freundlich izotermi

Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 ile sırasıyla toz aktif karbon ve bentonit için Temkin izoterm eşitliğinden elde edilen korelasyon katsayıları sunulmuştur.



Şekil 5.11. Farklı toz aktif karbon konsantrasyonlarında metilen mavisi adsorpsiyonuna ait Temkin izotermi



**Şekil 5.12.** Farklı bentonit konsantrasyonlarında metilen mavisi adsorpsiyonuna ait Temkin izotermi

Adsorpsiyon prosesinin farklı adsorban miktarlarında Langmuir, Freundlich ve Temkin izotermi kullanılarak incelenmesi sonucu hesaplanan veriler Çizelge 5.2 ile sunulmuştur. Çizelge 5.2’de görüldüğü üzere Langmuir izotermine göre korelasyon katsayıları toz aktif karbon için 0,9991; 0,9199; 0,9383 ve 0,852 iken bentonit için 0,998; 0,9992; 0,9982 ve 0,749 olarak tespit edilmiştir. Langmuir izoterm modeli incelemesinde diğer bir parametre olan boyutsuz ayırma faktörü  $R_L$ , her iki adsorban kullanıldığında da 0 ile 1 aralığında bulunmuştur. Boyutsuz ayırma faktörünün bu aralıkta olması metilen mavisinin adsorpsiyonu için her iki adsorbanın da uygun bir seçim olduğunu gösterebilir (Eren ve Acar, 2004). Langmuir izoterm modelinde maksimum adsorpsiyon kapasitesini ifade eden  $q_m$  (mg/g) değerleri sırasıyla toz aktif karbon için 227,2727; 232,5581; 185,1852 ve 181,8182; bentonit için ise 138,8889; 126,5823; 136,9863 ve 303,0303 olarak bulunmuştur. Buradan yola çıkarak sulu çözeltilerden metilen mavisi gideriminde, toz aktif karbonun bentonite göre daha etkili bir adsorban olduğunu söyleyebiliriz.

**Çizelge 5.2.** Toz aktif karbon ve bentonite ait izoterm sabitleri

İzoterm Modeli	Toz Aktif Karbona Ait Parametreler				Bentonite Ait Parametreler			
	$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$R_L$	$R^2$	$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$R_L$	$R^2$
Langmuir								
400 mg/100 ml	227,2727	22,0	0,0179	0,9991	138,8889	4,5	0,0816	0,998
600 mg/100 ml	232,5581	21,5	0,0183	0,9199	126,5823	4,1579	0,0878	0,9992
800 mg/100 ml	185,1852	13,5	0,0288	0,9383	136,9863	4,2941	0,0852	0,9982
1000 mg/100 ml	181,8182	13,75	0,0283	0,852	303,0303	8,25	0,0462	0,749
Freundlich	$n$	$K_F$ (L/mg)	$R^2$	$n$	$K_F$ (L/mg)	$R^2$		
400 mg/100 ml	5,95	0,2226	0,9943	2,2	0,1831	0,9969		
600 mg/100 ml	8,90	0,2406	0,9973	2,0	0,1767	0,9988		
800 mg/100 ml	9,92	0,2446	0,9977	2,12	0,1813	0,9956		
1000 mg/100 ml	10,41	0,2464	0,9991	3,94	0,2097	0,9999		
Temkin	$B_T$ (j/mol)	$K_T$ (L/mg)	$R^2$	$B_T$ (j/mol)	$K_T$ (L/mg)	$R^2$		
400 mg/100 ml	44,614	0,0073	0,9956	95,541	0,1451	0,9982		
600 mg/100 ml	31,514	0,0005	0,9976	100,93	0,1679	0,9993		
800 mg/100 ml	28,611	0,0002	0,9983	97,5	0,1528	0,9975		
1000 mg/100 ml	27,398	0,0001	0,9995	63,222	0,0384	0,9999		

Çizelge 5.2’de görüldüğü üzere Langmuir izotermine göre korelasyon katsayıları toz aktif karbon için 0,9991; 0,9199; 0,9383 ve 0,852 iken bentonit için 0,998; 0,9992; 0,9982 ve 0,749 olarak tespit edilmiştir. Langmuir izoterm modeli incelemesinde diğer bir parametre olan boyutsuz ayırma faktörü  $R_L$ , her iki adsorban kullanıldığında da 0 ile 1 aralığında bulunmuştur. Boyutsuz ayırma faktörünün bu aralıkta olması bize metilen mavisinin adsorpsiyonu için her iki adsorbanın da uygun bir seçim olduğunu söyleyebilir (Eren ve Acar, 2004). Langmuir izoterm modelinde maksimum adsorpsiyon kapasitesini ifade eden  $q_m$  (mg/g) değerleri sırasıyla toz aktif karbon için 227,2727; 232,5581; 185,1852 ve 181,8182; bentonit için ise 138,8889; 126,5823; 136,9863 ve 303,0303 olarak bulunmuştur. Buradan yola çıkarak sulu çözeltilerden metilen mavisi gideriminde, toz aktif karbonun bentonite göre daha etkili bir adsorban olduğunu söyleyebiliriz.

Freundlich izotermine göre korelasyon katsayıları toz aktif karbon için 0,9943; 0,9973; 0,9977 ve 0,9991 olup bentonit için 0,9969; 0,9988; 0,9956 ve 0,9999 olarak hesaplanmıştır. Freundlich izotermine adsorpsiyon şiddetinin göstergesi olan  $n$  değeri toz aktif karbon ve bentonit için 1'den büyük değerlerdir. Bu durumda toz aktif karbon ve bentonit adsorbanlarının metilen mavisi boyar maddesini etkin biçimde adsorplayabildiğini ifade edebiliriz (Deniz, 2010). Ayrıca  $n$  değerinin 1'den büyük olması fiziksel adsorpsiyonun elverişli olduğuna işaret etmektedir. Freundlich izoterm modelinde adsorpsiyon kapasitesini ifade eden  $K_F$  (L/mg) değerleri toz aktif karbon için 0,2226; 0,2406; 0,2446 ve 0,2464 olarak hesaplanırken bentonit için 0,1831; 0,1767; 0,1813 ve 0,2097 olarak bulunmuştur. Bu da bize adsorban olarak kullanılan toz aktif karbonun bentonite göre daha yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu işaret edebilir.

Temkin izotermine göre korelasyon katsayıları toz aktif karbon için 0,9956; 0,9976; 0,9983 ve 0,9995 iken bentonit için 0,9982; 0,9993; 0,9975 ve 0,9999 olarak bulunmuştur. Temkin izoterm modelinin adsorpsiyon ısısı ile ilgili olan sabiti  $B_T$ 'nin toz aktif karbon ve bentonit için tüm değerlerinin pozitif olarak bulunması prosesin ekzotermik olarak yürüdüğünün göstergesidir.

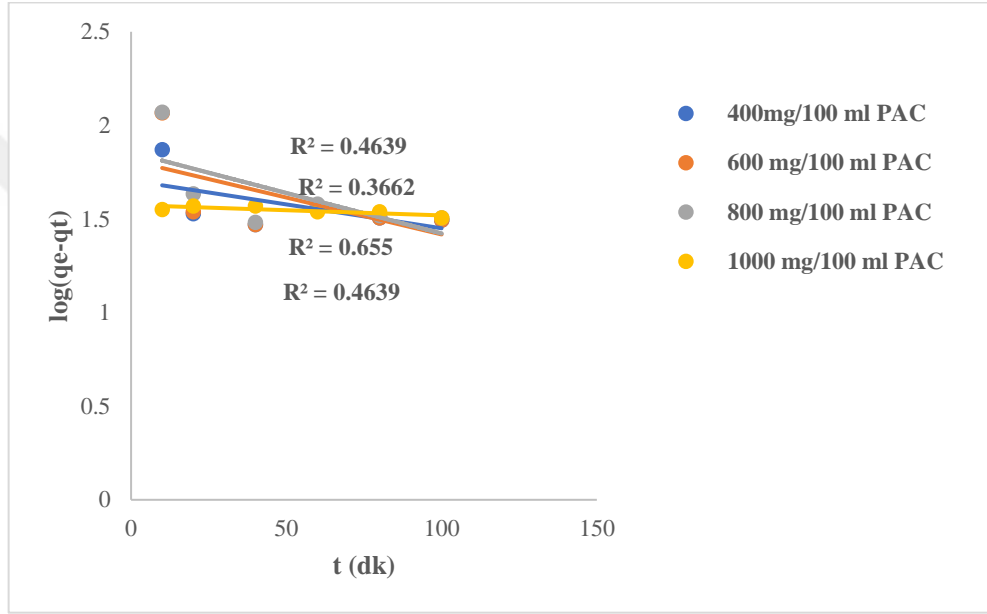
Tüm bu veriler ışığında, öncelikle korelasyon katsayılarının yüksekliği göz önünde tutularak devam eden incelemelerde ise Langmuir izoterm modeli boyutsuz ayırma faktörü  $R_L$ 'nin adsorpsiyon prosesi için elverişli olduğu aralıkta bulunması, Freundlich izotermi adsorpsiyon şiddetini ifade eden  $n$  değerinin 1'den büyük değerleri toz aktif karbon ve bentonit adsorbanları üzerine metilen mavisi adsorpsiyonunun Freundlich ve Temkin izotermi ile iyi bir uyum sergilerken Langmuir izotermi ile daha az uyum içinde olduğunu gösterebilir.

## **5.8. Adsorpsiyon Kinetiği**

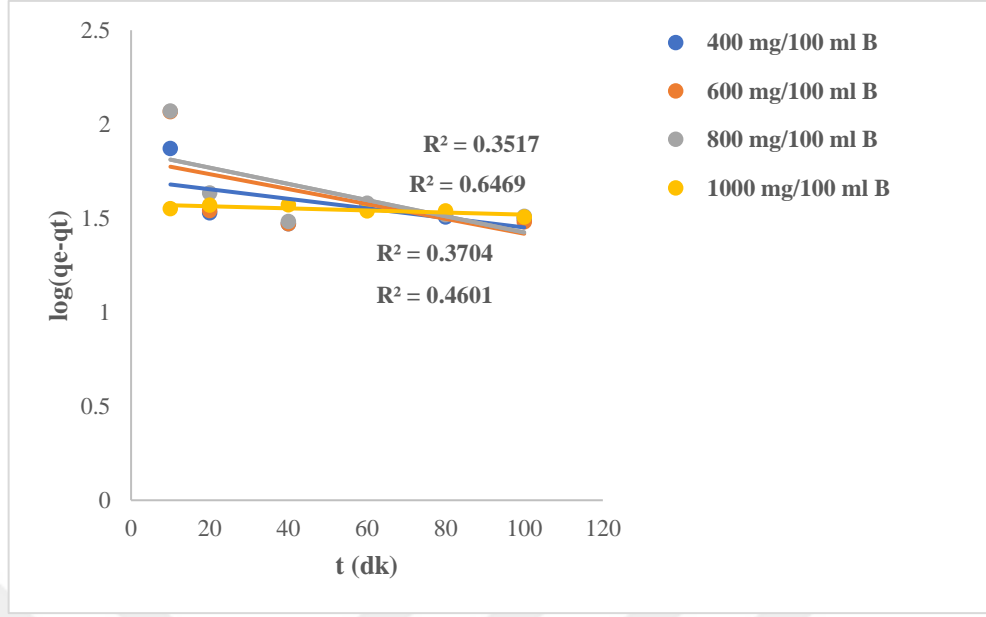
Adsorpsiyon veriminin değerlendirilmesi amacıyla toz aktif karbon ve bentonit kullanılarak metilen mavisi gideriminin kinetik olarak incelemesi için adsorbanlarda metilen mavisi adsorpsiyonunun kinetiklerinin analizinde yalancı birinci merteye ve yalancı ikinci merteye kinetik modellerinin (2.9) ve (2.10) denklemlerinden yararlanılarak grafikler elde edilmiş, kinetik sabitler hesaplanmıştır.

### 5.8.1. Yalancı Birinci Mertebe Adsorpsiyon Kinetiği

Metilen mavisi boyar maddesinin toz aktif karbon ve bentonite adsorpsiyonunda, dört farklı adsorban miktarı seçilerek (400 mg/100 ml; 600 mg/100 ml; 800 mg/100 ml ve 1000 mg/100 ml) elde edilen veriler kullanılarak birinci mertebe kinetik modele uygunluğunu incelemek amacıyla  $t$ 'ye karşı  $\log(q_e - q_t)$  grafikleri çizilmiştir. Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 ile sırasıyla toz aktif karbon ve bentonit için yalancı birinci mertebe kinetik modellerine ait korelasyon katsayıları sunulmuştur.



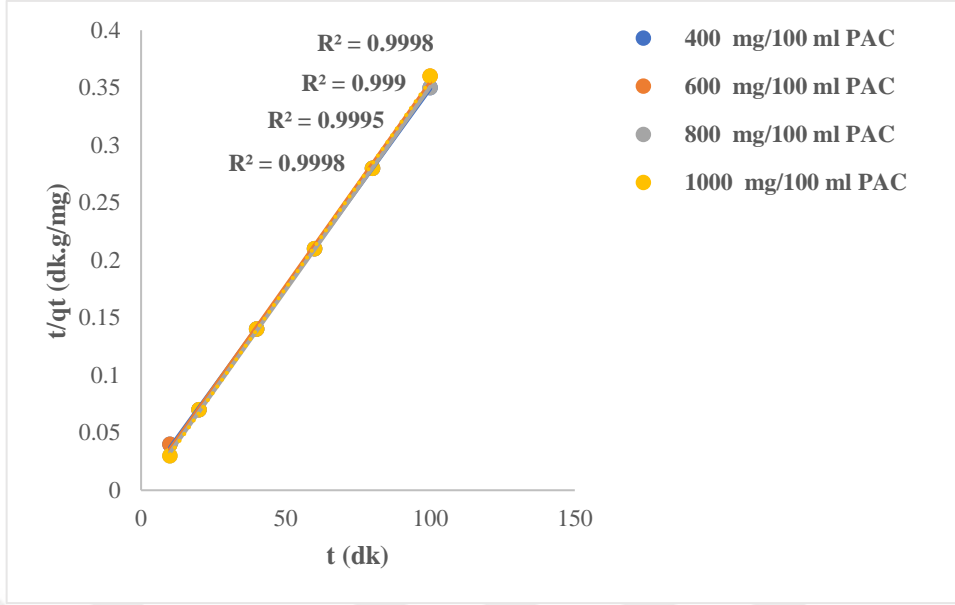
Şekil 5.13. Toz aktif karbon üzerine metilen mavisi adsorpsiyonu için elde edilen yalancı birinci mertebe kinetik modeline ait grafiği



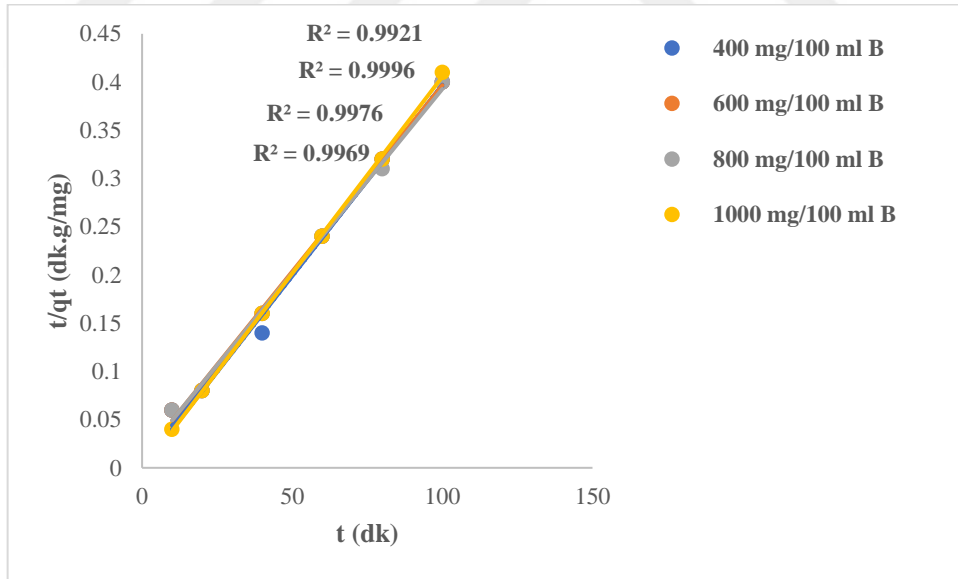
**Şekil 5.14.** Bentonit üzerine metilen mavisi adsorpsiyonu için elde edilen yalancı birinci merteye kinetik modeline ait grafiği

### 5.8.2. Yalancı İkinci Merteye Adsorpsiyon Kinetiği

Adsorpsiyon prosesinin ikinci merteye kinetik modele uygunluğunu araştırmak amacıyla dört farklı adsorban miktarı seçilerek (400 mg/100 ml; 600 mg/100 ml; 800 mg/100 ml ve 1000 mg/100 ml) elde edilen veriler kullanılarak t'ye karşı t/q<sub>t</sub> grafiği çizilmiştir. Şekil 5.15 ve Şekil 5.16 ile sırasıyla toz aktif karbon ve bentonite ait yalancı ikinci merteye kinetik modeline ait korelasyon katsayıları görülmektedir.



**Şekil 5.15.** Toz aktif karbon üzerine metilen mavisi adsorpsiyonu için elde edilen yalancı ikinci mertbe kinetik modeline ait grafiği



**Şekil 5.16.** Bentonit üzerine metilen mavisi adsorpsiyonu için elde edilen yalancı ikinci mertbe kinetik modeline ait grafiği

Çizelge 5.3 ile toz aktif karbon ve bentonite ait yalancı birinci merteye kinetik model ile yalancı ikinci merteye kinetik modele ait parametreler hesaplanıp sunulmuştur.

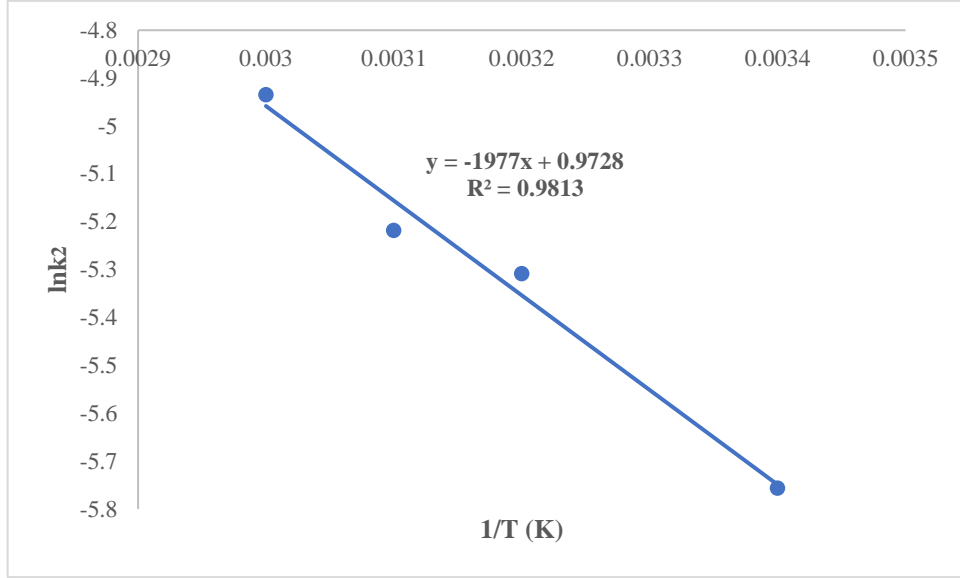
**Çizelge 5.3.** Toz aktif karbon ve bentonite ait yalancı birinci ve yalancı ikinci merteye kinetik parametreleri

Toz Aktif Karbon	Yalancı Birinci Merteye Kinetik Model				Yalancı İkinci Merteye Kinetik Model			
	$k_1$ ( $dk^{-1}$ )	$q_e$ hesap.	$q_e$ deney.	$R^2$	$k_2$ ( $mg/g.dk$ )	$q_e$ hesap.	$q_e$ deney.	$R^2$
400 mg/100 ml	0,006	1,7054	5,5181	0,3538	0,0026	5,5036	5,5181	0,9998
600 mg/100 ml	0,009	1,8118	5,6211	0,3662	0,0002	6,1215	5,6211	0,999
800 mg/100 ml	0,010	1,8553	5,6600	0,4639	0,0026	6,3936	5,6600	0,9998
1000 mg/100 ml	0,0014	1,5744	5,6571	0,655	0,005	4,8278	5,6571	0,9995
Bentonit	$k_1$ ( $dk^{-1}$ )	$q_e$ hesap.	$q_e$ deney..	$R^2$	$k_2$ ( $mg/g.dk$ )	$q_e$ hesap.	$q_e$ deney.	$R^2$
400 mg/100 ml	0,0058	1,7051	5,1638	0,3517	0,0051	5,5019	5,1638	0,9921
600 mg/100 ml	0,0092	1,8137	5,0728	0,3704	0,0104	6,1331	5,0728	0,9976
800 mg/100 ml	0,0099	1,8548	5,1344	0,4601	0,0112	6,3904	5,1344	0,9969
1000 mg/100 ml	0,0014	1,5744	5,5249	0,6469	0,0024	4,8293	5,5249	0,9996

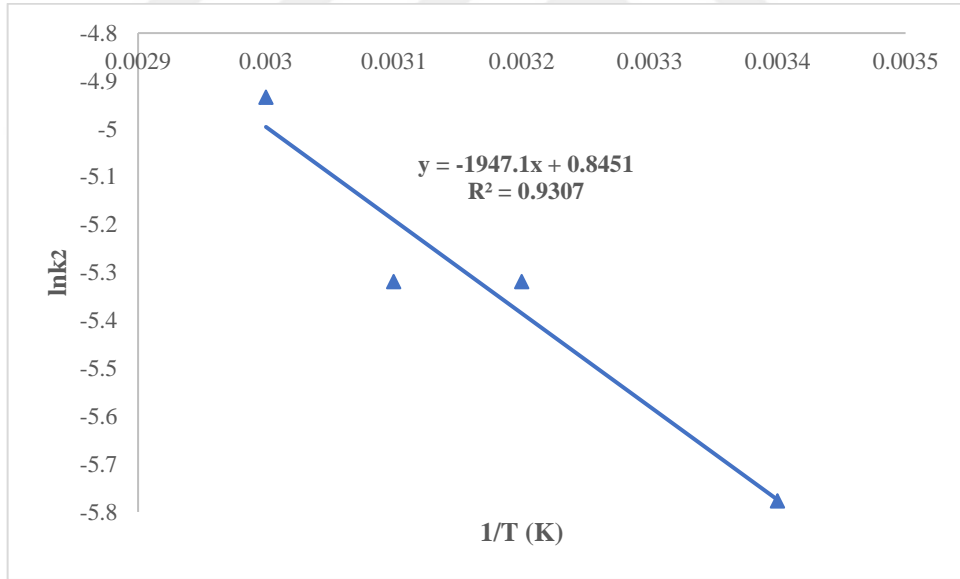
Çizelge 5.3’de görüldüğü üzere toz aktif karbon ve bentonite ait yalancı birinci merteye ve yalancı ikinci merteye korelasyon katsayıları incelendiğinde, ikinci merteye kinetik modele ait korelasyon katsayılarının yüksek olması neticesinde metilen mavisinin toz aktif karbon ve bentonit üzerine adsorpsiyonunun yalancı ikinci merteye kinetik modele uygun olduğu söylenebilir. İkinci merteye kinetik modele göre deneysel olarak elde edilen  $q_e$  değerlerinin hesaplanan  $q_e$  değerleriyle birbirine yakın olduğu gözlemlenmektedir.

### 5.8.3. Aktivasyon Enerjisi

Toz aktif karbon ve bentonit üzerine metilen mavisini adsorpsiyon prosesinin kinetik olarak incelenmesinde aktivasyon enerjisi hesaplamaları (2.10) denklemi yardımıyla yapılmıştır. Sırasıyla toz aktif karbon ile bentonite ait Arrhenius eğrileri Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de görülmektedir.



Şekil 5.17. Toz aktif karbon üzerine metilen mavisi adsorpsiyonuna ait Arrhenius eğrisi



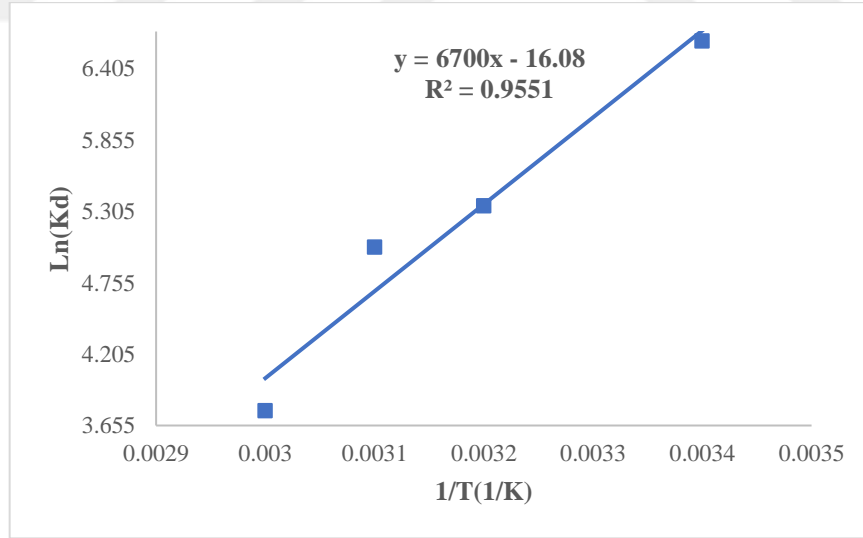
Şekil 5.18. Bentonit üzerine metilen mavisi adsorpsiyonuna ait Arrhenius eğrisi

Şekil 5.17 ve Şekil 5.18 ile sunulan grafikler yardımıyla hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri toz aktif karbon için 16,44 kJ/mol; bentonit için ise 16,19 kJ/mol olarak bulunmuştur. Buradan yola çıkarak elde edilen verilere göre literatürde yer alan fiziksel

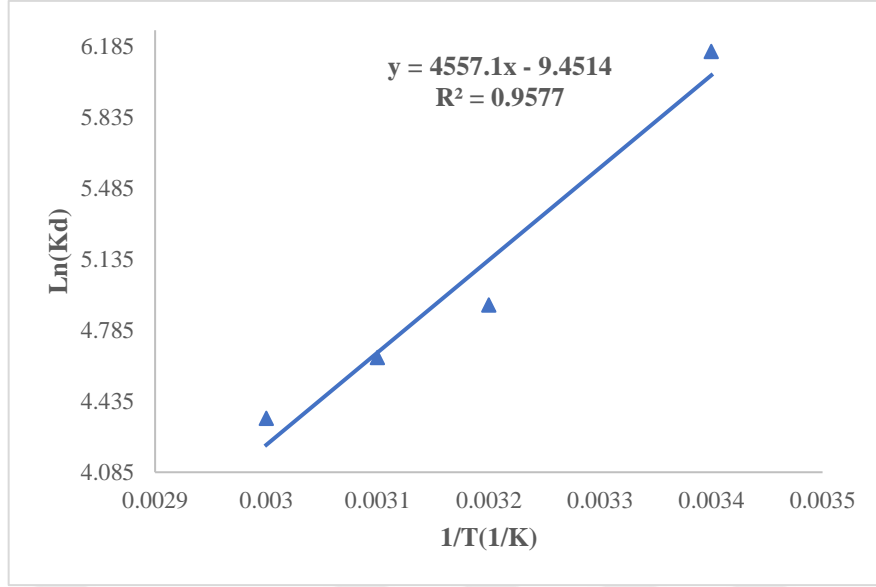
proseslerde 20 kJ/mol'den düşük tespit edilen toz aktif karbon ve bentonit üzerine metilen mavisi adsorpsiyonunun her iki adsorban kullanıldığı durumda da fiziksel adsorpsiyon olarak gerçekleştiği ifade edilebilir (Sayiner, 2012). Ayrıca aktivasyon enerjilerinin düşük değerlerde bulunması bizi adsorpsiyon prosesinin başlaması için ihtiyaç duyulan enerji eşiğinin düşük olduğu sonucuna ulaştırabilir. Literatürde yer alan bazı çalışmalarda da benzer sonuçlar mevcuttur (Özdemir, 2005).

### 5.9. Termodinamik Analizler

Metilen mavisinin toz aktif karbon ve bentonit üzerine adsorpsiyonun aydınlatılması amacıyla gerçekleştirilen termodinamik analizlerde 25°C, 35°C, 45°C ve 55°C olmak üzere 4 farklı sıcaklık değeri seçilmiştir. Standart serbest enerji değişimi ( $\Delta G^\circ$ ), entalpi değişimi ( $\Delta H^\circ$ ) ve entropi değişimi ( $\Delta S^\circ$ ) gibi termodinamik değişkenler (2.11), (2.12), (2.13) ve (2.14) denklemleri yardımıyla hesaplanmıştır.  $1/T$ 'ye karşı  $\ln K_d$  doğrusal olarak grafik edilmiştir. Şekil 5.19 ve Şekil 5.20 ile toz aktif karbon ve bentonite ait Van't Hoff eşitliği grafikleri sunulmuştur. Elde edilen doğrunun eğimi ve kaymasından  $\Delta H^\circ$  ve  $\Delta S^\circ$  değerleri bulunmuştur (Okumuş ve Doğan, 2019).



Şekil 5.19. Toz aktif karbona ait Van't Hoff eşitliği grafiği



**Şekil 5.20.** Bentonite ait Van't Hoff eşitliği grafiği

Toz aktif karbon ve bentonite ait termodinamik parametreler Çizelge 5.4 ile sunulmuştur.

**Çizelge 5.4.** Toz aktif karbon ve bentonite ait termodinamik parametreler

	T (°C)	$\Delta H^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta S^\circ$ (kJ/mol.K)	$\Delta G^\circ$ (kJ/mol)
<b>Toz aktif karbon</b>	25	-55,70	-0,1337	-16,4
	35	-55,70	-0,1337	-13,7
	45	-55,70	-0,1337	-13,3
	55	-55,70	-0,1337	-10,28
<b>Bentonit</b>	25	-37,89	-0,0786	-15,26
	35	-37,89	-0,0786	-12,57
	45	-37,89	-0,0786	-12,29
	55	-37,89	-0,0786	-11,86

Çizelge 5.4'teki parametreleri incelediğimizde toz aktif karbon ve bentonit için tüm sıcaklık değerlerinde  $\Delta H^\circ$  (kJ/mol) değerlerinin negatif olduğunu görürüz. Bu da bize metilen mavisinin toz aktif karbon ve bentonit üzerine gerçekleşen adsorpsiyon prosesinin doğasının ekzotermik olduğunu gösterir. Toz aktif karbon ve bentonite ait  $\Delta S^\circ$  (kJ/mol.K) değerleri sırasıyla -0,1337 ve -0,0786 olarak tespit edilmiştir. Negatif  $\Delta S^\circ$  (kJ/mol.K) değerleri adsorpsiyon sırasında katı-çözelti ara yüzeyinde düzensizliğin

azaldığını (Erşan ve Düğenci, 2024), adsorbanlar ile metilen mavisi boyar maddesi arasında hızlı bir etkileşimin mevcut olduğunu göstermektedir. Her iki adsorbanın kullanıldığı durumda da  $\Delta G^\circ$  (kJ/mol) değerlerinin negatif olması, prosesin yürütüldüğü sıcaklıklarda adsorpsiyonun kendiliğinden gerçekleşebileceğini, prosesin adsorpsiyon işlemi için enerjiye ihtiyaç duymadığını, sıcaklık arttıkça  $\Delta G^\circ$  (kJ/mol) değerlerinin artış göstermesi ise daha düşük sıcaklıklarda adsorpsiyonun uygulanabilirliğini gösterebilir (Rao ve Khan, 2017).



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Toz aktif karbon ve bentonit yüzeyinde metilen mavisi adsorpsiyonu pH, sıcaklık, karıştırma hızı, adsorban miktarı ve boyar madde konsantrasyonu parametrelerini içeren bir dizi çalışma ile incelenmiştir. Adsorpsiyon kinetiği ve termodinamiği verilerinin de tespit edilmesi neticesinde elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

Toz aktif karbon ve bentonit yüzeylerinde katyonik bir boyar madde olan metilen mavisinin adsorplanmış miktarının pH artışı ile arttığı, adsorpsiyon prosesi gerçekleşirken toz aktif karbon için de bentonit için de sıcaklık artışının boya giderim verimini düşürücü yönde etkilediği, toz aktif karbon ve bentonit yüzeylerinde metilen mavisi adsorpsiyonunun artan karıştırma hızı ile önemli seviyede artış kaydetmediği, adsorpsiyon prosesi üzerinde adsorban miktarının değişim verileri incelendiğinde, her iki adsorban için de miktar arttırıldığında boya giderim veriminin artış gösterdiği, toz aktif karbon ve bentonit için başlangıç boya konsantrasyonu arttıkça metilen mavisi giderim veriminin azaldığı, optimal çalışma şartlarında, toz aktif karbonla çalışıldığında boya giderim veriminin %99,73; maksimum adsorpsiyon kapasitesinin 227,2727 mg/g; bentonitle çalışıldığında boya giderim veriminin %94,32; maksimum adsorpsiyon kapasitesinin 303,0303 mg/g olduğu, adsorpsiyon prosesinin adsorban olarak toz aktif karbon kullanıldığında da bentonit kullanıldığında da ekzotermik bir proses olduğu ve kendiliğinden gerçekleştiği, deneysel verilerin her iki adsorbandan yararlanıldığı durumda da Freundlich ve Temkin izotermi ile iyi bir uyum sergilediği, Langmuir izotermi ile daha az uyum gösterdiği, adsorpsiyon prosesinin her iki adsorban kullanıldığında da yalancı ikinci mertebe kinetik model ile uyum içinde olduğu, adsorpsiyon ısı verilerinin incelenmesi sonucunda, adsorbatla adsorbent arasındaki etkileşimlerin her iki durumda da fiziksel olarak gerçekleştiği, tekstil atık sularında boyar madde gideriminde toz aktif karbon ve bentonitin etkin biçimde kullanılabileceği söylenebilir.

Yapılan denemeler ile tespit edilen sonuçların uygulanabilirliği ve geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilebilecek çalışma önerileri şu şekildedir:

Tekstil atık sularından boyar madde gideriminde doğal killere gerçekleştirilen adsorpsiyon prosesinin geliştirilmesinin hem düşük maliyetli oluşu hem de yüksek verim alınması açısından faydalı olacağı söylenebilir. Geliştirilecek prosesin küçük ölçekli denemeler ile test edilmesi bu konuda yapılan diğer çalışmalarla kıyaslama olanağı elde etmemizi sağlayabilir. Doğal killere denemelerin yaygınlaştırılması boyar madde giderimi için çevrecil ve etkili bir çözüm sunabilir. Literatüre bakıldığında aktif karbonun adsorpsiyon prosesindeki verimli sonuçlarını göz önüne alarak düşük bütçeli çalışmalar yapmak adına ve elde edilmesi zahmetli olmayan doğal kökenli aktif karbon adsorbanları alternatif olabilir. Farklı maddelerle aktive edilmiş toz aktif karbon ve bentonit adsorbanlarının tekstil atık sularında farklı boyar maddeler için gideriminin araştırması yapılabilir. Adsorpsiyon prosesinin mevcut bir organize sanayi bölgesinde faaliyet gösteren tekstil fabrikasına ait atık suyu üzerinde denemesi sağlanabilir. Boyar madde kaynaklı su kirliliklerini önlemek amacıyla yapılacak olan bu çalışmalar çevre kirliliğinin önüne geçmemizde etkin rol oynayıp ekolojik dengenin sürekliliğinin sağlanmasında ciddi adımlar atmamızı sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- Abak, H. (2008). Sulu Çözeltilerden Metilen Mavisinin Fındık Kabuğu Yüzeyine Adsorpsiyon ve Adsorpsiyon Kinetiği, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81s, Balıkesir.
- Aboua, K. N., Yobouet, Y. A., Yao, K. B., Gone, D. L., Trokourey, A. (2015). Investigation of Dye Adsorption onto Activated Carbon from The Shells of Macoré Fruit, *Journal of Environmental Management*, 156, 4-10.
- Akçay, E. (2018). Tirebolu Bentoniti Üzerine Adsorpsiyon ile Sulu Çözeltilerden Metilen Mavisinin Uzaklaştırılması, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 56s, Trabzon.
- Altundal, Z. (2021). Sulu Çözeltiden Katyonik Boyar Madde Giderimi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 64s, Edirne.
- Anirudhan, T. S., Ramachandran, M. (2015). Adsorptive Removal of Basic Dyes from Aqueous Solutions by Surfactant Modified Bentonite Clay (Organoclay): Kinetic and Competitive Adsorption Isotherm, *Process Safety and Environmental Protection*, 95, 215-225.
- Arana, J. M. R. R., Mazzoco, R. R. (2010). Adsorption Studies of Methylene Blue and Phenol onto Black Stone Cherries Prepared by Chemical Activation, *Journal of Hazardous Materials*, 180(1-3), 656-661.
- Asri, G. N. (2021). Tekstil Endüstrisi Atıksularının İleri Oksidasyon Yöntemleri ile Arıtılması, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 66 s, Denizli.
- Ay, M. (2019). Sporopollen Yüzeyde 2Hidroksinaftalinmetilenaminopiridin Bileşiğinin İmmobilizasyonu ve Metal Uzaklaştırmada Kullanımı, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 49s, Karaman.
- Aydın, M. (2023). Vermikülit Kullanılarak Sulu Çözeltiden Boyar Maddenin Uzaklaştırılması, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 57s, Denizli.

- Bağcı, S. (2014). Lupinus Albus'tan Elde Edilen Aktif Karbonun Sulu Çözeltilerdeki Adsorpsiyon Özelliklerinin İncelenmesi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 88s, Konya.
- Bayar, S. (2018). Metilen Mavisinin Doğal Kil Üzerine Adsorpsiyonu, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 264-272.
- Baysal, E. (2016). Poliamin Polimeri ile Platin (IV) Adsorpsiyonunun İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 56s, Sakarya.
- Bellir, K., Bencheikh-Lehocine, M., Meniai, A. H. (2010). Removal of Methylene Blue from Aqueous Solutions Using an Acid Activated Algerian Bentonite: Equilibrium and Kinetic Studies, International Renewable Energy Congress, 360-367.
- Benaisa, S., Arhoun, B., El Mail, R., Rodriguez, Maroto, J.M. (2018). Potential of Brown Algae Biomass As New Biosorbent of Iron: Kinetic, Equilibrium and Thermodynamic Study, *Journal of Materials and Environmental Science*, 9, 2131–2141.
- Bentahar, S., Dbik, A., El Khomri, M., El Messaoudi, N., Lacherai, A. (2017). Adsorption of Methylene Blue, Crystal Violet and Congo Red from Binary and Ternary Systems with Natural Clay: Kinetic, Isotherm and Thermodynamic, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(6), 5921-5932.
- Boukhatem, H., Ouazene, N., Rezala, H., Djouadi, L., Selami, S., Zeraif, S. (2023). Removal of Methylene Blue Dye From Aqueous Media by Adsorption Using Nickel Oxide Modified Montmorillonite Composite, *Indian Journal of Chemical Technology (IJCT)*, 30(6), 812-821.
- Crini, G., Peindy, H. N., Gimbert, F., Robert, C. (2007). Removal of Cl Basic Green 4 (Malachite Green) from Aqueous Solutions by Adsorption Using Cyclodextrin-Based Adsorbent: Kinetic and Equilibrium Studies, *Separation and Purification Technology*, 53(1), 97-110.
- Çeşmeli, Ç. (2011). Sentetik Kaynaklı Aktif Karbon ile Pestisit Giderimi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 70s, İstanbul.

- Çetin, F. N. (2019). Sulardaki Nikel ve Kadmiyumun Bentonit ile Giderilmesi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 52s, Aksaray.
- Çiçekçi, A., Dönmez, B., Kavcı, E., Laçın, Ö. (2020). Malahit Yeşilinin Şeftali Çekirdeği Kabuğu Üzerine Adsorpsiyon İzotermi ve Termodinamiği, *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 103-111.
- Çufadar, F. (2020). Şabazit Minerali (Zeolit) ile Sentetik Boyaların Sulu Çözeltilerden Uzaklaştırılması, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 62s, Konya.
- Deniz, C. (2010). Ağır Metal ve Renk İçeren Atıksuların Gideriminin Adsorpsiyon/Biyosorpsiyon Yöntemleriyle Araştırılması, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 131s, Sivas.
- Doğan, M., Alkan, M., Türkyılmaz, A., Özdemir, Y. (2004). Kinetics and Mechanism of Removal of Methylene Blue on to Perlite, *Journal of Hazardous Materials*, B109, 141-148.
- Duran, C., Özdeş, D., Şentürk, H. B. ve Alp, İ. (2009). Metilen Mavisinin Doğal Tirebolu Bentoniti Üzerine Adsorpsiyon Karakteristiklerinin İncelenmesi, 14. Ulusal Kil Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 617-627, Trabzon.
- Eren, Z., Acar, F. N. (2004). Uçucu Kül Adsorpsiyonu ile Reaktif Boya Giderimi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2), 253-258.
- Erşan, M., Düğenci, F. (2024). Üleksit Esaslı Bor Kullanarak Atıksulardan Yaygın Kullanım Alanlı Bir Antibiyotik Olan Tetrasiklinin Gideriminin İncelenmesi, *Journal of Boron*, 9(1), 1-8.
- Gökara, G. (2013). İğde Çekirdeğinden Elde Edilen Aktif Karbon Üzerinde Tekstil Boyar Maddelerinin Adsorpsiyonu, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 115s, Edirne.
- Gumus, R. H., Okpeku, I. (2015). Production of Activated Carbon and Characterization from Snail Shell Waste (Helix Pomatia), *Advances in Chemical Engineering and Science*, 5, 51-61.

- Gündoğdu, A. (2010). Fabrika ay Atıklarından Aktif Karbon Üretimi, Karakterizasyonu ve Adsorpsiyon Özelliklerinin İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 197s, Trabzon.
- Gündüzoğlu, G. (2008). Şeker Pancarı Kúspesinden Aktif Karbon Üretimi ve Karakterizasyonu, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 133s, Eskişehir.
- Güven, O. (2010). Farklı Bentonit Tipleri ile Stiren Bütül Akrilat Esaslı Nanokompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 69s, İstanbul.
- Hajjaji, M., El Arfaoui, H. (2009). Adsorption of Methylene Blue and Zinc Ions on Raw and Acid-Activated Bentonite from Morocco, *Applied Clay Science*, 46(4), 418-421.
- Han, Q., Wang, J., Goodman, B. A., Xie, J., Liu, Z. (2020). High Adsorption of Methylene Blue by Activated Carbon Prepared from Phosphoric Acid Treated Eucalyptus Residue, *Powder Technology*, 366, 239-248.
- Hmeid, H. A., Akodad, M., Baghour, M., Moumen A., Skalli, A., Guedarri, H., El Yousfi Y., Maach, M., Riouchi, O., Azizi, G. (2021). Adsorption of A Basic Dye, Methylene Blue, In Aqueous Solution on Bentonite, *Moroccan Journal of Chemistry*, 9(3), 416-433.
- Ibrahim, A. J., Dwesh, H. A. W., Al-Sawad, A. R. (2023). Adsorption of Methylene Blue Dye onto Bentonite Clay: Characterization, Adsorption izoterms and Thermodynamics Study by Using UV-Vis Technique, *Analytical Methods in Environmental Chemistry Journal*, 6(03), 5-18.
- Iqbal, M. J., Ashiq, M. N. (2007). Adsorption of Dyes from Aqueous Solutions on Activated Charcoal, *Journal of Hazardous Materials*, 139(1), 57-66.
- İli, A. (2017). Sulu özeltilerden Pestisitlerin Adsorpsiyonunda Zeytinyağı Fabrikası Katı Atığından (Pirina) Elde Edilen Aktif Karbonun Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 156s, Sakarya.

- Jawad, A. H., Saber, S. E. M., Abdulhameed, A. S., Farhan, A. M., ALOthman, Z. A., Wilson, L. D. (2023). Characterization and Applicability of the Natural Iraqi Bentonite Clay for Toxic Cationic Dye Removal: Adsorption Kinetic and Isotherm Study, *Journal of King Saud University-Science*, 35(4), 1-9.
- Jin, X., Jiang, M. Q., Shan, X. Q., Pei, Z. G., Chen, Z. (2008). Adsorption of Methylene Blue and Orange II onto Unmodified and Surfactant-Modified Zeolite, *Journal of Colloid and Interface Science*, 328(2), 243-247.
- Karaoğlu, M. H. (2007). Sulu Çözeltilerden Bazı Boyar Maddelerin Fizikokimyasal Yöntemlerle Giderilmesi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 241s, Balıkesir.
- Kavcı, E. (2022). Ucuz Bir Adsorbent ile Metil Mavisinin Giderimi: Optimizasyon, ANOVA Analizi, *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 71-80.
- Kaya, A., Ören, A. H. (2005). Adsorption of Zinc From Aqueous Solutions to Bentonite, *Journal of Hazardous Materials*, 125(1-3), 183-189.
- Kılıç, A. (2018). Kayısı Çekirdeği ve Badem Kabuğu Karışımından Aktif Karbon Üretimi ve Sulu Ortamlardan Boyar Madde Giderimi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 91s, Elazığ.
- Kocabıyık, B. (2023). Siyez (*Triticum Monococcum* L.) Buğdayı Kavuzundan Elde Edilen Aktif Karbon Kullanılarak Kirleticilerin Sulu Çözeltilerden Adsorpsiyon Metoduyla Uzaklaştırılması, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 130s, Edirne.
- Levankumar, L., Muthukumar, V., Gobinath, M. B. (2009). Batch Adsorption and Kinetics of Chromium (VI) Removal from Aqueous Solutions by *Ocimum Americanum* L. Seed Pods, *Journal of Hazardous Materials*, 161(2-3), 709-713.
- Mergen, C. (2018). Aktif Karbon, Amberlyst ve Doğal Biyokütle Kullanılarak Bromocresol Purple Boyasının Atık Sulardan Giderim Koşullarının İncelenmesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71s, Bilecik.

- Musthofa, A. M. H., Syafila, M., Helmy, Q. (2023). Effect of Activated Carbon Particle Size on Methylene Blue Adsorption Process in Textile Wastewater, *Indonesian Journal of Chemistry*, 23(2), 461-474.
- Müjde, B., Özer, A. (2003). Şeker Pancarı Küspesi Karbonizasyon Ürünü ile Sulu Çözeltilerden Cd (II) İyonlarının Adsorpsiyonu, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2), 233-243.
- Namal, O. Ö. (2017). Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Kullanılan Proseslerin Araştırılması, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 388-396.
- Oğuz, A. (2013). Harran Ovasında Yaygın Olarak Üretilen Pamuk ve Mısır Sapından Aktif Karbon Üretilmesi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 54s, Şanlıurfa.
- Okumuş, Z. Ç., Doğan, T. H. (2019). Biyodizeldeki Suyun Reçine ile Uzaklaştırılması: Adsorpsiyon İzotermi, Kinetiği ve Termodinamik İncelemesi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 561-570.
- Öncel, M. (2015). Zeytin Posası (Pirina) Üzerine Metil Viyoletin Sulu Çözeltiden Adsorpsiyonu, Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 52s, Kilis.
- Özcan, Ö. (2013). Biyokütlenin Yavaş Piroliz Yöntemiyle Bozundurulması ve Aktif Karbon Eldesi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 76s, Eskişehir.
- Özdemir, Y. (2005). Katyonik Boyar Maddelerin Sepiyolit Yüzeyinde Adsorpsiyonu ve Adsorpsiyon Kinetiği, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 96s, Balıkesir.
- Özkılıç, M. A. (2019). Nohuttan Elde Edilen Aktif Karbon Üzerine Basic Yellow 28 Adsorpsiyonu, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71s, Kocaeli.
- Öztürk, T. (2017). Adsorpsiyon Yöntemi ile Reaktif Boyarmadde Gideriminde Çeşitli Adsorbentlerin Etkinliğinin Değerlendirilmesi, Namık Kemal Üniversitesi Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Proje No: NKUBAP.00.17.AR.14.16, 31s, Tekirdağ.

- Özüsoy, M. (2022). Atık Biyokütleden Elde Edilen Aktif Karbonun Metilen Mavisi Adsorpsiyonunda Kullanımı, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 65s, Afyon.
- Pathania, D., Sharma, S., Singh, P. (2017). Removal of Methylene Blue by Adsorption onto Activated Carbon Developed from Ficus Carica Bast, *Arabian Journal of Chemistry*, 10, 1445-1451.
- Peltek, H. (2012). Yüzey Aktif Katyonlarla Modifiye Edilmiş Ünye Bentonit ve Tartrazin Boyarmaddesi Arasındaki Etkileşimlerin XRD, TG/DTA, FTIR Analiz Tekniklerinin Kullanılmasıyla ve Adsorpsiyon Verilerinin Değerlendirilmesiyle İncelenmesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, Rize.
- Rao, R. A. K., Khan, U. (2017). Adsorption of Ni (II) on Alkali Treated Pineapple Residue (Ananas Comosus L.): Batch and Column Studies. *Groundwater for Sustainable Development*, 5, 244-252.
- Sarikaya, Y. (2003). Fizikokimya, Gazi Büro, 633, Ankara.
- Sarısoylu Nart, A. (2024). Amberlyst 15 Polimerik Reçinesi Kullanılarak Metilen Mavisi Boyasının Atık Sulardan Giderim Koşullarının İncelenmesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74s, Bilecik.
- Savaş, C. N. (2023). Ayçiçeği Tablasından Kimyasal Aktivasyonla Hazırlanan Aktif Karbonların İlaç Salımında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 75s, Balıkesir.
- Saymer, B. (2012). Siyanür Liçinde Altının Aktif Karbona Adsorpsiyonunda Çeşitli Metallerin Etkisinin Araştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 101s, İstanbul.
- Shokoohi, R., Vatanpoor, V., Zarrabi, M., Vatani, A. (2010). Adsorption of Acid Red 18 (AR18) by Activated Carbon from Poplar Wood- A Kinetic and Equilibrium Study, *Journal of Chemistry*, 7, 65-72.
- Sözüdoğru, O., Fil, B. A., Boncukcuoğlu, R., Aladağ, E., Kul, S. (2016). Adsorptive Removal of Cationic (BY2) Dye from Aqueous Solutions onto Turkish Clay:

- Isotherm, Kinetic and Thermodynamic Analysis, *Particulate Science and Technology*, 34(1), 103-111.
- Şentürk, H. B., Özdeş, D., Duran, C., Avan, H., Biçer, B. (2011). Doğal İllitik Kil Minerali Üzerine Metilen Mavisini Adsorpsiyonu, Ankara Üniversitesi, 12. Ulusal Spektroskopi Kongresi, Bildiri Özetleri Kitapçığı, P-158, s:196, Antalya.
- Uraz, E. (2015). Çinkonun Bentonit ile Adsorpsiyon Özelliklerinin İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 111s, İstanbul.
- Ustabaş, E. (2016). İşlenmiş ve Demlenenmiş Atık Çaydan Elde Edilen Aktif Karbonun Tekstil Boyar Maddesi Metilen Mavisini Adsorplama Özellikleri, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 84s, Edirne.
- Uysal, T., Acar, R., Erdemir, E. G. (2015). Zenginleştirilmiş Vermikülitin Metilen Mavisini Adsorpsiyonunda Kullanımı, 9. Uluslararası Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 371-379, İzmir.
- Yasin, Y., Hussein, M. Z., Ahmad, F. H. (2007). Adsorption of Methylene Blue onto Treated Activated Carbon, *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 11(2), 400-406.
- Yılmaz, N., Alagöz, O. (2019). Nar Kabuklarından Kimyasal Aktivasyon ile Hazırlanan Aktif Karbon Üzerinde Metilen Mavisinin Adsorpsiyonu, *El-Cezeri*, 6(3), 817-829.
- Zhang, Z., Xu, L., Liu, Y., Feng, R., Zou, T., Zhang, Y., Kang, Y., Zhou, P. (2021). Efficient Removal of Methylene Blue Using the Mesoporous Activated Carbon Obtained from Mangosteen Peel Wastes: Kinetic, Equilibrium and Thermodynamic Studies, *Microporous and Mesoporous Materials*, 315, 110904.
- Zhou, J. L., Banks, C. J. (1993). Mechanism of Humic Acid Colour Removal from Natural Waters by Fungal Biomass Biosorption, *Chemosphere*, 27(4), 607-620.
- Zorbay, F. (2010). Yer Fıstığı Kabuklarından Elde Edilen Sentetik Aktif Karbon ile Metilen Mavisini Giderimi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 68s, İstanbul.

## İnternet Kaynakları

Bentonit Tedavisi, (2024). Bentonit, [bentonitedavisi.com/bentonit/bentonit-ve-montmorillonit-nedir/](http://bentonitedavisi.com/bentonit/bentonit-ve-montmorillonit-nedir/) (Erişim Tarihi: 24.05.2024).

ResearchGate, (2024). Metilen mavisi, [https://www.researchgate.net/figure/Molecular-structure-of-methylene-blue\\_fig1\\_281738079](https://www.researchgate.net/figure/Molecular-structure-of-methylene-blue_fig1_281738079) (Erişim Tarihi: 24.05.2024).



# ÖZGEÇMİŞ

## Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Ceren CENGİZ

## Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Atatürk Üniversitesi/ Kimya Mühendisliği	2010
Lise	Türkbirliği Lisesi	2004

## Mesleki Deneyim

Yıl	Yer	Görev
2022-Halen	Yozgat Şeker Fabrikası	Teknik Şef
2017-2022	Uşak Şeker Fabrikası	Mühendis

## Yabancı Dil

İngilizce

## Yayımlar

Cengiz, C., Levent, M. (2024). Mihaliçcik Kili ve Bentonitle Sulu Çözeltilerde Metilen Mavisi Giderimi, 5. Uluslararası Modern Bilimsel Araştırmalar Kongresi, 21-22 Nisan 2024, (Methylene Blue Removal in Aqueous Solutions with Mihaliçcik Clay and Bentonite, 5th International Congress on Contemporary Scientific Research, 21-22 April 2024), 975-989, Kayseri, Türkiye.

Cengiz, C., Levent, M. (2024). Toz Aktif Karbon ve Bentonitle Sulu Çözeltilerde Metilen Mavisi Giderimi, 5. Uluslararası Modern Bilimsel Araştırmalar Kongresi, 21-22 Nisan 2024, (Methylene Blue Removal in Aqueous Solutions with Powdered Activated Carbon and Bentonite, 5th International Congress on Contemporary Scientific Research, 21-22 April 2024), 990-1004, Kayseri, Türkiye.

