



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KİMYA ANABİLİM DALI

KİMYA TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**AMBERLYST 15, AMBERLYST A21 VE MODİFİYE AKTİF KARBON
KULLANILARAK AMOXICILLIN ADSORPSİYONU VE GERİ KAZANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARDELEN ALTAN ERTAŞ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. HÜLYA SİLAH

BİLECİK, 2026

10815930

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

**AMBERLYST 15, AMBERLYST A21 VE MODİFİYE AKTİF KARBON
KULLANILARAK AMOXICILLIN ADSORPSİYONU VE GERİ KAZANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARDELEN ALTAN ERTAŞ

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. HÜLYA SİLAH

BİLECİK, 2026
10815930



**KARDELEN
ALTAN ERTAŞ**

**AMBERLYST 15, AMBERLYST A21 VE
MODİFİYE AKTİF KARBON
KULLANILARAK AMOXICILLIN
ADSORPSİYONU VE GERİ
KAZANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BEYAN

“Amberlyst 15, Amberlyst A21 ve Modifiye Aktif Karbon Kullanılarak Amoxicillin Adsorpsiyonu ve Geri Kazanımı” başlıklı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, [Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine](#) uygun olarak tez/dönem projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Kardelen Altan Ertaş

../../20..

İmza:

Bölüm I. Yapay Zekâ Kullanım Durumu

- ☒ Bu tezin/projenin yazım süreçlerinde yapay zekâ tabanlı araçlardan **faýdalandım**.
☐ Bu tezin/projenin yazım süreçlerinde yapay zekâ tabanlı herhangi bir araçtan **faýdalanmadım**.

Bölüm II. Yapay Zekâ Kullanım Detayları

**Bu bölüm yalnızca yapay zekâ kullanımı beyan edilmiş ise doldurulacaktır. Aksi durumda boş bırakılmalıdır.*

Tezinizde/projenizde kullandığınız yapay zekâ araçlarını ve sürümünü listeleyiniz:

ChatGPT, GPT-5.5

**Yapay zekâ araçlarını tezin/projemin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım.
(Birden fazla seçenek işaretlenebilir):**

- ☐ Cümle oluşturma
- ☐ Literatür tarama
- ☐ Çeviri
- ☐ Düzenleme/dil kontrolü
- ☐ Veri işleme ve analizi
- ☐ Veri görselleştirme
- ☒ Görüntü üretme
- ☐ Kaynakça düzenleme
- ☐ Diğer (Belirtiniz):.....

Bu çalışmada yapay zekâ kullanımı ***Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber***'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup yapay zekâ araçlarından alınan destek, etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir. Yapay zekâ kullanımı, çalışmanın özgünlüğüne, bilimsel etik kurallarına ve ilgili mevzuata aykırı olmayacak biçimde gerçekleştirilmiştir. Usulsüz yapay zekâ kullanımı (örneğin: kaynak göstermeksizin metin üretimi, otomatik içerik üretiminin özgün eser gibi sunulması, yanıltıcı kaynak gösterimi vb.) tarafımdan kesinlikle yapılmamıştır. Yapay zekâ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

Kardelen Altan Ertaş

.././20..

İmza:

ÖN SÖZ

Her bilimsel çalışma, yalnızca elde edilen sonuçlardan değil; o sonuçlara ulaşırken gösterilen emek, sabır ve kararlılıktan da oluşur. Bu tez, bilimsel bir araştırmanın yanı sıra bana öğrenmeyi, gelişmeyi ve vazgeçmeden ilerlemeyi öğreten uzun bir yolculuğun ürünüdür.

Bu yolculuk boyunca bilgi ve deneyimlerini büyük bir özveriyle benimle paylaşan, akademik bakış açımı geliştirmemde önemli katkılar sağlayan, her aşamada yol gösteren, eleştirileri ve önerileriyle çalışmama değer katan danışman hocam Doç. Dr. Hülya SİLAH'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez ders dönemi boyunca bilgi ve deneyimleriyle akademik gelişimime katkı sağlayan, derslerini büyük bir özveri ve titizlikle yürüten değerli hocalarım Kimya Bölüm Başkanı Prof. Dr. Bilge EREN'e, ayrıca Prof. Dr. Mustafa ARIK ile Doç. Dr. Adem SARIHAN'a kıymetli katkıları, emekleri ve destekleri için içtenlikle teşekkür ederim.

Hayatımın her anında olduğu gibi bu akademik süreçte de en büyük gücü ailemden aldım. Yoğun çalışma temposunda gösterdiği anlayış, sabır ve koşulsuz desteğiyle her zaman yanımda olan sevgili eşim Mesut ERTAŞ'a ve varlığıyla en yorucu günleri bile anlamlı kılan canım oğlum Mikail'e sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca bu süreçte bana her zaman destek olan, yardımlarını ve anlayışlarını esirgemeyen kıymetli kayınvalideme ve kayınpederime şükranlarımı sunarım.

Bugün sahip olduğum her değer ve ulaştığım her başarının temelinde; hayatları boyunca sevgilerini, emeklerini ve fedakârlıklarını benden esirgemeyen sevgili annem, babam ve kardeşimin payı büyüktür. Bana çalışkanlığı, sabretmeyi ve zorluklar karşısında vazgeçmemeyi öğreten, hayallerimin peşinden giderken her an arkamda dimdik duran aileme, bana kattıkları tüm değerler ve koşulsuz sevgileri için sonsuz minnetlerimi sunuyor; bu çalışmayı onlara ithaf ediyorum.

ÖZET

Bu tez çalışmasında, sağlık sektöründe yaygın olarak kullanılan Amoksisilin'in sulu çözeltilerden adsorpsiyon yöntemiyle giderimi araştırılmıştır. Adsorbent olarak polimerik iyon değiştirici reçineler Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 ile aktif karbon ve dodesiltrimetilamonyum bromür ile modifiye edilmiş aktif karbon (DTMAB-MAK) kullanılmıştır. Adsorpsiyon süreci; çözelti pH'ı, temas süresi, adsorbent miktarı, başlangıç Amoksisilin derişimi ve sıcaklık gibi farklı deneysel parametreler açısından değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda her iki polimerik reçine için en uygun çözelti pH'ı 4 olarak belirlenmiştir. Amberlyst A21 için 60 dakikalık temas süresi sonunda %88,70, Amberlyst 15 için ise 75 dakikalık temas süresi sonunda %82,53 giderim elde edilmiştir. Adsorbent miktarının artırılmasıyla giderim yüzdesinin arttığı, başlangıç Amoksisilin derişiminin yükselmesiyle ise genel olarak giderim yüzdesinin azaldığı, buna karşılık birim adsorbent başına adsorplanan Amoksisilin miktarının arttığı belirlenmiştir. Adsorpsiyon denge verileri Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin–Radushkevich ve Redlich–Peterson izoterm modelleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 için en yüksek korelasyon katsayıları Redlich–Peterson modelinde elde edilmiş olmakla birlikte, Langmuir modeli de deneysel verilere yüksek uyum göstermiştir. Langmuir modeline göre maksimum adsorpsiyon kapasiteleri Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 için sırasıyla yaklaşık 89,29 mg/g ve 44,25 mg/g olarak belirlenmiştir. Kinetik değerlendirmeler sonucunda Amberlyst A21 üzerindeki Amoksisilin adsorpsiyonunun yalancı ikinci derece kinetik modele, Amberlyst 15 üzerindeki adsorpsiyonun ise yalancı birinci derece kinetik modele daha iyi uyum gösterdiği belirlenmiştir. Amberlyst A21 için gerçekleştirilen termodinamik incelemelerde adsorpsiyon sürecinin kendiliğinden gerçekleştiği ve endotermik karakter taşıdığı belirlenmiştir. FTIR analizleri, amoksisilin'in Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 yüzeylerine adsorplandığını ve farklı moleküller arası etkileşimlerin adsorpsiyona katkı sağladığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Adsorpsiyon, Amberlyst A21, Amberlyst 15, Amoksisilin, İzoterm, Kinetik.

ABSTRACT

This thesis investigates the removal of Amoxicillin, a commonly used substance in the healthcare sector, from aqueous solutions using the adsorption method. Polymeric ion-exchange resins Amberlyst A21 and Amberlyst 15, along with activated carbon and dodecyltrimethylammonium bromide-modified activated carbon (DTMAB-MAK), were used as adsorbents. The adsorption process was evaluated in terms of various experimental parameters such as solution pH, contact time, adsorbent amount, initial Amoxicillin concentration, and temperature. Experimental studies determined that the optimal solution pH for both polymeric resins was 4. For Amberlyst A21, 88.70% removal was achieved after 60 minutes of contact time, and for Amberlyst 15, 82.53% removal was achieved after 75 minutes of contact time. It was determined that increasing the adsorbent amount increased the removal percentage, while increasing the initial Amoxicillin concentration generally decreased the removal percentage, but increased the amount of Amoxicillin adsorbed per unit of adsorbent. Adsorption equilibrium data were evaluated using Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin–Radushkevich, and Redlich–Peterson isotherm models. While the highest correlation coefficients for Amberlyst A21 and Amberlyst 15 were obtained with the Redlich–Peterson model, the Langmuir model also showed a high fit to the experimental data. According to the Langmuir model, the maximum adsorption capacities for Amberlyst A21 and Amberlyst 15 were determined to be approximately 89.29 mg/g and 44.25 mg/g, respectively. Kinetic evaluations revealed that amoxicillin adsorption on Amberlyst A21 fit the pseudo-second-order kinetic model better, while adsorption on Amberlyst 15 fit the pseudo-first-order kinetic model better. Thermodynamic studies performed on Amberlyst A21 indicated that the adsorption process occurred spontaneously and exhibited an endothermic character. FTIR analyses showed that amoxicillin was adsorbed onto the surfaces of Amberlyst A21 and Amberlyst 15, and that different intermolecular interactions contributed to the adsorption.

Keywords: Adsorption, Amberlyst A21, Amberlyst 15, Amoxicillin, Isotherm, Kinetic.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. AMOKSİSİLİN.....	4
2.1. Amoksisilin'in Antibakteriyel Etki Mekanizması.....	6
2.2. Amoksisilin Kullanım Alanları	7
2.2.1. Solunum yolu enfeksiyonları	7
2.2.2. <i>Helicobacter pylori</i> eradikasyonu	8
2.2.3. Ürogenital sistem enfeksiyonları.....	8
2.2.4. Dental profilaksi ve endokardit önleme	8
2.2.5. Deri ve yumuşak doku enfeksiyonları	8
2.3. Amoksisilin'in Spesifik ve Etiket Dışı (Off-Label) Kullanım Alanları	9
2.3.1. Enfeksiyöz endokardit profilaksisi	9
2.3.2. Periodontitis ve dental kombinasyonlar.....	9
2.4. Amoksisilin'in Tarihçesi ve Keşfi	10
2.5. Amoksisilin'in Diğer Canlılar Üzerindeki Ekolojik Etkileri	14
2.5.1. Sucul organizmalar ve fitoplanktonlar üzerindeki toksisite	14
2.5.2. Omurgasızlar ve balıklar üzerindeki fizyolojik etkiler.....	15
2.5.3. Toprak canlıları ve mikrobiyal çeşitlilik	15
2.6. Amoksisilin Maddesinin Adsorbentlerle Gideriminde Literatürden Örnekler	15
3. ADSORPSİYON	28

3.1. Adsorpsiyon Türleri.....	29
3.1.1. Fiziksel adsorpsiyon (Fizisorpsiyon).....	29
3.1.2. Kimyasal adsorpsiyon (Kemisorpsiyon).....	29
3.2. Adsorpsiyona Etki Eden Faktörler	30
3.2.1. Adsorbentin türü ve özellikleri.....	31
3.2.2. Adsorbatın (Adsorplanan madde) türü	36
3.2.3. Çözelti pH'ı	36
3.2.4. Başlangıç adsorbat derişimi	36
3.2.5. Sıcaklık	37
3.2.6. Temas (Dengeye gelme) süresi	37
3.2.7. Adsorbent miktarı (Dozaj)	37
3.2.8. Karıştırma hızı.....	38
3.2.9. Yüzey yapısı, genişliği ve gözeneklilik	38
3.3. Adsorpsiyon Termodinamiği.....	38
3.4. Adsorpsiyon Kinetiği	39
3.4.1. Yalancı (Pseudo) birinci dereceden kinetik model	39
3.4.2. Yalancı (Pseudo) ikinci dereceden kinetik model	39
3.4.3. Parçacık içi difüzyon modeli	40
3.5. Adsorpsiyon İzoterm Modelleri.....	43
3.5.1. Langmuir izoterm modeli	45
3.5.2. Freundlich izoterm modeli	48
3.5.3. Temkin izoterm modeli	50
3.5.4. Dubinin-Radushkevich (D-R) izoterm modeli.....	52
3.5.5. Redlich-Peterson izoterm modeli.....	54
4. SU ARITIM YÖNTEMLERİ	56
4.1. Membran Filtrasyon Teknolojileri.....	56

4.2. İleri Oksidasyon Prosesleri (İOP / AOPs).....	57
4.2.1. Ozonlama (Ozonation).....	58
4.2.2. Fenton ve foto-fenton prosesi	58
4.2.3. Fotokataliz (TiO ₂ /UV).....	59
4.3. Geleneksel Biyolojik Arıtma Yöntemleri	59
4.3.1. Aktif çamur prosesi	59
4.4. Elektrokimyasal Arıtma Yöntemleri	60
4.4.1. Elektrokoagülasyon (EC)	60
4.4.2. Elektrokimyasal oksidasyon (Anodik Oksidasyon)	61
4.5. Koagülasyon - Flokülasyon (Pıhtılaştırma - Yumaklaştırma).....	61
5. MATERYAL VE METOT	65
5.1. Amoksisilin Çözeltisi.....	65
5.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Kimyasal Maddeler	65
5.2.1. Amberlyst 15 adsorbenti ve hazırlanması	65
5.2.2. Amberlyst A21 adsorbenti ve hazırlanması	66
5.2.3. Modifiye aktif karbon adsorbentleri ve hazırlanması	67
5.2.4. Diğer kimyasallar ve çözeltiler	68
5.3. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihazlar	68
5.3.1. Hassas terazi	68
5.3.2. UV-Vis spektrometre	69
5.3.3. Manyetik karıştırıcı.....	69
5.3.4. pH metre.....	70
5.3.5. Santrifüj	70
5.3.6. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR).....	71
5.4. Adsorpsiyon Prosesi ve Optimum Deneysel Koşulların Belirlenmesi.....	72
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	73

6.1. UV-GB Spektroskopisi ile Amoksisilin Tayini.....	73
6.2. Amoksisilin Adsorpsiyonu Üzerine Çözelti pH'nın Etkisi	75
6.2.1 Amberlyst 15 ve Amberlyst A21 ile Amoksisilin adsorpsiyonu	76
6.2.2. Modifiye aktif karbon ile Amoksisilin adsorpsiyonu	78
6.2.3. Ortam pH'ının adsorpsiyon mekanizması üzerindeki etkisi.....	80
6.3. Temas Süresinin Amoksisilin Adsorpsiyonu Üzerine Etkisi	86
6.4. Adsorbent Miktarının Amoksisilin Adsorpsiyonu Üzerine Etkisi.....	88
6.5. Amoksisilin Başlangıç Derişiminin Adsorpsiyon Üzerine Etkisi	89
6.6. Amoksisilin Adsorpsiyonunda İzoterm İncelemeleri.....	92
6.7. Amoksisilin Adsorpsiyon Kapasitelerinin Literatürde Bildirilen Farklı Adsorbentlerle Karşılaştırılması.....	100
6.8. Adsorpsiyon Kinetik İncelemeleri	106
6.9. Adsorpsiyon Termodinamiği.....	109
6.10. FT-IR Analizleri	111
6.11. Geri Kazanım Çalışmaları	116
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	117
KAYNAKÇA	119

ÇİZELGELER LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Amoksisilin' in fizikokimyasal özellikleri.....	5
Çizelge 2.2. Amoksisilin' in kullanım alanları ve hedef hastalıklar.....	10
Çizelge 2.3. Amoksisilin' in ilaç profili.....	12
Çizelge 2.4. Literatürdeki farklı adsorbentlerin Amoksisilin giderim performanslarının karşılaştırılması	24
Çizelge 3.1. Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyonun temel farklılıkları	30
Çizelge 3.2. Farklı adsorbent türlerinin avantaj ve dezavantajları.....	33
Çizelge 3.3. Adsorpsiyon kinetik modellerinin karşılaştırılması	41
Çizelge 3.4. Yıllar içinde geliştirilen adsorpsiyon izoterm modelleri.....	44
Çizelge 3.5. Langmuir izoterm modeline ait parametreler	47
Çizelge 3.6. Freundlich izoterm modeline ait parametreler	49
Çizelge 3.7. Temkin izoterm modeline ait parametreler	51
Çizelge 3.8. Dubinin-Radushkevich (D-R) izoterm modeline ait parametreler.....	53
Çizelge 3.9. Redlich-Peterson izoterm modeline ait parametreler.....	55
Çizelge 4.1. Farklı su arıtım yöntemlerinin temel özelliklerinin karşılaştırılması.....	62
Çizelge 5.1. Amberlyst® 15 reçinesinin fiziksel, yapısal ve iyon değişim özellikleri.....	66
Çizelge 5.2. Amberlyst® A21 Reçinesinin fiziksel, yapısal ve iyon değişim özellikleri.....	67
Çizelge 6.1. Amoksisilin' in Amberlyst A21 yüzeyine adsorpsiyonunda çözelti pH'nın giderim yüzdeleri ve adsorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi.....	76
Çizelge 6.2. Amoksisilin' in Amberlyst 15 yüzeyine adsorpsiyonunda çözelti pH'nın giderim yüzdeleri ve adsorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi.....	77
Çizelge 6.3. Amoksisilin' in aktif karbon yüzeyine adsorpsiyonunda çözelti pH'nın giderim yüzdeleri ve adsorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi.....	79
Çizelge 6.4. Amoksisilin' in adsorpsiyonunda aktif karbon adsorbent türünün ve çözelti pH'nın giderim yüzdeleri üzerine etkisi.....	79
Çizelge 6.5. Amoksisilin' in Amberlyst A21 ile adsorpsiyonunda temas süresinin etkisi.....	87
Çizelge 6.6. Amoksisilin' in Amberlyst 15 ile adsorpsiyonunda temas süresinin etkisi.....	87
Çizelge 6.7. Amoksisilin' in giderim yüzdeleri üzerine Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 miktarının etkisi.....	88

Çizelge 6.8. Amoksisilin'in Amberlyst A21 yüzeyine adsorpsiyonunda başlangıç derişiminin giderim yüzdesi ve adsorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi.....	90
Çizelge 6.9. Amoksisilin'in Amberlyst 15 yüzeyine adsorpsiyonunda başlangıç derişiminin giderim yüzdesi ve adsorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi.....	91
Çizelge 6.10. Amberlyst A21 yüzeyine Amoksisilin adsorpsiyonu için elde edilen izoterm eşitlikleri ve izoterm sabitleri.....	95
Çizelge 6.11. Amberlyst 15 yüzeyine Amoksisilin adsorpsiyonu için elde edilen izoterm eşitlikleri ve izoterm sabitleri.....	99
Çizelge 6.12. Literatürdeki farklı adsorbent türlerine ait Amoksisilin adsorpsiyon kapasitelerinin karşılaştırılması.....	101
Çizelge 6.13. Amoksisilin adsorpsiyonu için elde edilen kinetik verileri.....	108
Çizelge 6.14. Farklı sıcaklıklarda Amberlyst A21 İle Amoksisilin adsorpsiyonu için elde edilen K_c değerleri.....	110
Çizelge 6.15. Amberlyst A21 üzerine Amoksisilin adsorpsiyonunun termodinamik parametreleri.....	111

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Çevresel kirleticilerin sınıflandırılması.....	2
Şekil 2.1. Amoksisilin'in keşif süreci.....	11
Şekil 3.1. Adsorpsiyona etki eden faktörler.....	31
Şekil 3.2. İzoterm yaklaşımlarının kronolojik gelişim evreleri.....	43
Şekil 5.1. Amberlyst 15'in görünümü.....	65
Şekil 5.2. Amberlyst A21'in kurutulmadan önceki (A) ve sonraki (B) görünümü.....	67
Şekil 5.3. DTMA-B-MAK adsorbentinin hazırlanması.....	68
Şekil 5.4. Denver Instrument TP-214 hassas terazi.....	69
Şekil 5.5. T80 UV/VIS Spectrometer PG Instrument marka spektrofotometre.....	69
Şekil 5.6. Daihan Scientific MS-MP8 marka manyetik karıştırıcı.....	70
Şekil 5.7. Metler Toledo Sevencompact model dijital pH metre.....	70
Şekil 5.8. Nüve NF 400 model santrifüj.....	71
Şekil 5.9. Perkin Elmer (Spectrum 100) model FTIR cihazı.....	71
Şekil 6.1. Amoksisilin'in UV-GB absorpsiyon spektrumu.....	74
Şekil 6.2. Amoksisilin için elde edilen kalibrasyon grafiği.....	75
Şekil 6.3. Amoksisilin'in Amberlyst A21 yüzeyine adsorpsiyonunda çözelti pH'nın giderim yüzdesi üzerine etkisi.....	77
Şekil 6.4. Amoksisilin'in Amberlyst 15 yüzeyine adsorpsiyonunda çözelti pH'nın giderim yüzdesi üzerine etkisi.....	78
Şekil 6.5. Farklı pKa değerlerinde amoksisilin iyonize formları.....	81
Şekil 6.6. Amoksisilin ile Amberlyst A21 arasındaki olası adsorpsiyon etkileşim mekanizmasının şematik gösterimi.....	83
Şekil 6.7. Amoksisilin ile Amberlyst 15 arasındaki olası adsorpsiyon etkileşim mekanizmasının şematik gösterimi.....	85
Şekil 6.8. Amoksisilin'in giderim yüzdesi üzerine Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 miktarının etkisi.....	89
Şekil 6.9. Amoksisilin'in Amberlyst A21 yüzeyine adsorpsiyonunda başlangıç derişiminin giderim yüzdesi üzerine etkisi.....	90

Şekil 6.10. Amoksisilin'in Amberlyst 15 yüzeyine adsorpsiyonunda başlangıç derişiminin giderim yüzdesi üzerine etki.....	91
Şekil 6.11. Amberlyst A21 yüzeyine Amoksisilin'in adsorpsiyonu için elde edilen izoterm grafikleri ve eşitlikleri.....	93
Şekil 6.12 Amberlyst 15 yüzeyine Amoksisilin'in adsorpsiyonu için elde edilen izoterm grafikleri ve eşitlikleri.....	97
Şekil 6.13. Amberlyst A21 Yüzeyine Amoksisilin adsorpsiyonu için kinetik modelleri.....	106
Şekil 6.14. Amberlyst 15 Yüzeyine Amoksisilin adsorpsiyonu için kinetik modelleri.....	107
Şekil 6.15. Amberlyst A21 yüzeyine Amoksisilin adsorpsiyonunun termodinamik grafiğı.....	110
Şekil 6.16. Amoksisilin ve Amoksisilin adsorpsiyonundan önce ve sonra Amberlyst A21'e ait FTIR spektrumları.....	112
Şekil 6.17. Amoksisilin ve Amoksisilin adsorpsiyonundan önce ve sonra Amberlyst 15'e ait FTIR spektrumları.....	114

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

A_T : Temkin izoterm denge bağlanma sabiti

A₀ : Başlangıç absorbans değeri

A_e : Adsorpsiyon sonunda absorbans değeri

Å : Ångström

b_T : Temkin izoterm sabiti

C : Adsorbent ile adsorbat arasında oluşan tabakanın kalınlığı hakkında bilgi veren sabit

°C : Santigrat derece

C₀ : Boya başlangıç derişimi (ppm, mg/L)

C_e : Adsorpsiyon sonrası çözeltide kalan madde miktarı (mg/L)

dk : Dakika

DTMAB : Dodesiltrimetil amonyum bromür

% G : Giderim yüzdesi

ΔG : Serbest enerji değışimi (Gibbs serbest enerjisi)

g : Gram

q_e : Birim adsorbent üzerine adsorplanan madde miktarı (mg/g)

q_m : Adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)

q_t : t zamanında adsorbentin gramı başına adsorplanan madde miktarı (mg/g)

ΔH : Entalpi değışimi

K : Kelvin

K_c : Adsorpsiyon denge sabiti

K_F : Freundlich izoterm sabiti

K_L : Langmuir izoterm sabiti

k₁ : Birinci dereceden hız sabiti

k₂ : İkinci dereceden hız sabiti

L : Litre

m : Adsorbent miktarı

MAK : Modifiye aktif karbon

mg : Miligram

MWCNT : Çok duvarlı karbon nanotüp

n : Adsorpsiyon yoğunluğu

nm : Nanometre

PBP : Penisilin Bağlayıcı Proteinler

ppm : Toplam madde miktarının milyonda biri

R : İdeal gaz sabiti ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

R_L : Boyutsuz ayırma faktörü

t : Süre

T : Mutlak Sıcaklık

ΔS : Entropi Değişimi

V : Çözelti hacmi

WHO : World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü)

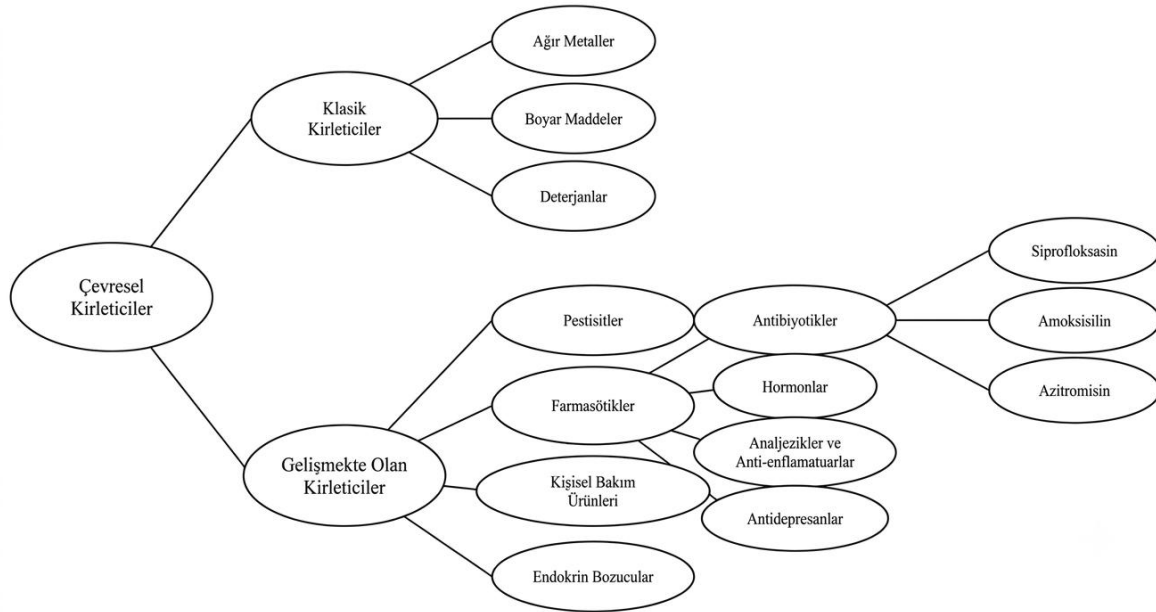
UV-Vis : UV-Görünür bölge

1. GİRİŞ

Tatlı su kaynakları, dünya üzerindeki toplam su varlığının yalnızca küçük bir bölümünü oluşturmalarına rağmen insan yaşamının, tarımsal üretimin ve sanayi faaliyetlerinin sürdürülebilirliği bakımından yerini hiçbir kaynağın tutamayacağı bir öneme sahiptir. Buna karşın nüfus artışı, iklim değişikliği ve düzensiz su kullanımı, dünya nüfusunun önemli bir kısmını su stresiyle karşı karşıya bırakmaktadır; 2022 yılı itibarıyla dünya nüfusunun yaklaşık yarısı yılın en az bir döneminde ciddi su kıtlığı yaşamıştır (UN-Water, 2025).

Su kaynaklarının azalmasının yanı sıra, mevcut kaynakların kirlenmesi de en az o kadar büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Evsel, tarımsal ve endüstriyel faaliyetler sonucunda ortaya çıkan boyalar, ağır metaller, deterjanlar ve farmasötik maddeler gibi çok çeşitli kirletici türleri, çoğunlukla yeterli arıtma işleminden geçirilmeden alıcı su ortamlarına deşarj edilmektedir. Birleşmiş Milletler'in 2024 verilerine göre halen 2,2 milyar insan güvenli içme suyuna erişimden yoksundur ve arıtılmamış atık suyun alıcı ortama karışması, su kirliliğini insan sağlığı ve ekosistemler açısından küresel bir sorun hâline getirmektedir (UN-Water, 2025). Bu durum, 2030 yılına kadar su kirliliğinin azaltılmasını ve arıtılmamış atık su oranının yarıya indirilmesini hedefleyen Sürdürülebilir Kalkınma Amacı 6 (Temiz Su ve Sanitasyon) kapsamında da açıkça vurgulanmaktadır (UN-Water, 2025).

Son yıllarda "gelişmekte olan kirleticiler" (emerging contaminants) olarak adlandırılan ve klasik atık su arıtma tesislerinde yeterince giderilemeyen bir kirletici grubu, bilim insanlarının giderek artan ilgisini çekmektedir (Şekil 1.1). Farmasötik aktif maddeler bu grubun başında gelmektedir; küresel ilaç üretiminin yılda yüzlerce tonu bulması ve bu maddelerin önemli bir kısmının insan ya da hayvan vücudundan metabolize olmadan atılması, farmasötiklerin yüzey sularında, yeraltı sularında ve hatta içme sularında saptanabilir düzeylerde bulunmasına yol açmaktadır (Papagiannaki vd., 2022). Bu maddeler düşük derişimlerde bulunsalar dahi biyolojik olarak aktif oldukları için kronik toksisite, biyobirikim ve endokrin bozucu gibi etkilere yol açabilmektedir (Anand vd., 2022).



Şekil 1.1. Çevresel kirleticilerin sınıflandırılması

(Nishmitha vd., 2025'ten uyarlanmıştır)

Farmasötik kirleticiler arasında antibiyotikler ayrı bir önem taşımaktadır; çünkü çevreye karışan antibiyotik kalıntıları yalnızca suçlu organizmalar üzerinde doğrudan toksik etki göstermekle kalmamakta, aynı zamanda antibiyotiğe dirençli bakteri (ARB) ve direnç genlerinin (ARG) ortaya çıkışını ve yayılımını da tetikleyebilmektedir (Kraemer vd., 2019). Amoksisilin, dünya genelinde en yaygın reçetelenen antibiyotiklerden biri olması nedeniyle bu grubun önde gelen temsilcilerindendir; hastane atık sularında 1172000 ng/L'ye, kentsel atık sularda ise birkaç bin ng/L düzeyine ulaşan derişimlerde tespit edilmiştir (Domínguez-Montero vd., 2025). Bu yaygın varlığı nedeniyle Amoksisilin, Azitromisin, Siprofloksasin ve Klaritromisin gibi antibiyotiklerle birlikte Avrupa Birliği'nin gelişmekte olan kirleticiler izleme listesine dahil edilmiştir (European Commission, 2015, 2018).

Farmasötik kirleticilerin sudan uzaklaştırılması amacıyla ozonlama, ileri oksidasyon, membran filtrasyon, elektrokimyasal oksidasyon ve biyolojik arıtma gibi çok sayıda yöntem geliştirilmiştir (Çizelge 4.1; Bölüm 4). Bu yöntemlerden ileri oksidasyon prosesleri yüksek giderim verimleri sunsa da yüksek enerji tüketimi, işletme maliyeti ve bazen daha toksik ara ürünlerin oluşması gibi sınırlılıklar taşımaktadır (Taoufik vd., 2021).

Adsorpsiyon yöntemi, bu sınırlılıklara kıyasla düşük enerji tüketimi, basit işletim koşulları ve yüksek giderim verimliliği sunması nedeniyle farmasötik kirleticilerin gideriminde öne çıkan bir teknik olarak kabul edilmektedir (Rivera-Utrilla vd., 2013). Aktif karbon bu alanda en yaygın

kullanılan adsorbent olsa da yüksek maliyeti, geniş ölçekli uygulamalarını sınırlamaktadır (Sporsho vd., 2025).

Bu sınırlılığı aşmak amacıyla son yıllarda alternatif adsorbent arayışı hız kazanmıştır. Polimerik iyon değiştirici reçineler bu arayışta dikkat çeken bir grup oluşturmaktadır; kararlı kimyasal yapıları, yüksek gözeneklilikleri ve tekrar kullanılabilirlikleri sayesinde farmasötik maddelerin adsorpsiyonunda etkili sonuçlar verdikleri bildirilmiştir. Örneğin Amberlite IRA-402 reçinesinin Amoksisilin gideriminde 512 mg/g gibi yüksek bir adsorpsiyon kapasitesine ulaştığı gösterilmiştir (Roa vd., 2026). Buna karşın, literatürde reçine bazlı adsorbentlerle Amoksisilin giderimini konu alan çalışma sayısı hâlâ oldukça sınırlıdır ve Amberlyst tipi reçinelerin bu amaçla kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

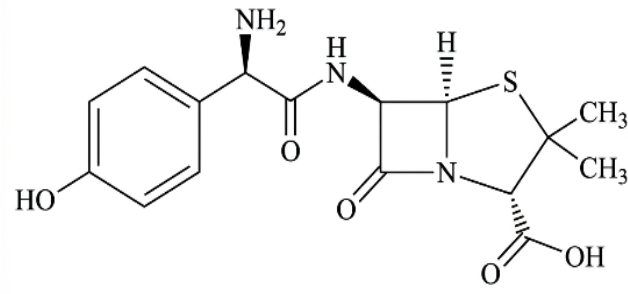
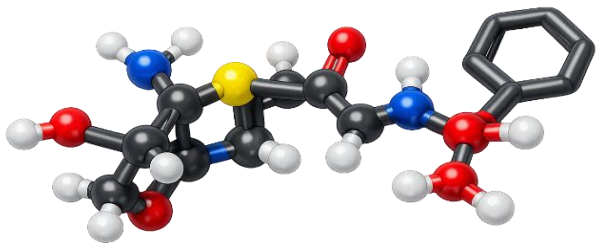
Bu tez çalışmasında, sulu ortamdan Amoksisilin'in adsorpsiyon yoluyla giderilmesi ve geri kazanılması amacıyla Amberlyst 15, Amberlyst A21 ve modifiye edilmiş aktif karbon adsorbent olarak kullanılmıştır. Çalışmanın amacı, bu üç adsorbentin Amoksisilin giderim performanslarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmek; adsorpsiyon sürecini kinetik, izoterm ve termodinamik modeller çerçevesinde açıklamak ve elde edilen bulgular ışığında Amoksisilin kirliliğinin gideriminde uygulanabilir bir yöntem önerisinde bulunmaktır.

2. AMOKSİSİLİN

Amoksisilin ($C_{16}H_{19}N_3O_5S$), yarı sentetik aminopenisilinler grubuna ait olup klinik pratikte yaygın biçimde kullanılan antibakteriyel ajanlardandır. 1970'li yıllardan bu yana hem tek başına hem de β -laktamaz inhibitörü klavulanik asitle kombine edilerek uygulanmakta; bu kombine form Avrupa ve dünya genelinde en çok reçete edilen penisilin türevleri arasında gösterilmektedir (Huttner vd., 2020). Dünya Sağlık Örgütü ise Amoksisilin'i temel ve erişilebilir antibiyotikler listesinde sınıflandırmaktadır (Sharland vd., 2018). Geniş bir etki alanına sahip olması, bu ilacın tedavide daha sık tercih edilmesini sağlayan önemli bir özelliktir. Amoksisilin, penisilin grubu antibiyotikler içinde yer alır ve temel penisilin yapısına bir amino grubunun eklenmesiyle geliştirilmiştir. Bu nedenle aminopenisilinler sınıfına dahil edilir. Yapısındaki bu değişiklik sayesinde bakterilerin hücre duvarı oluşturma süreci engellenir ve böylece ilacın mikroorganizmalar üzerindeki etkisi daha güçlü hale gelir (Akhavan vd., 2023). Kimyasal yapısı incelendiğinde, temel bir β -laktam halkasının beş üyeli bir tiyazolidin halkasıyla birleştiği görülür. Onu yapısal ikizi olan ampisilinden ayıran en kritik fark, yan zincirindeki para-pozisyonuna eklenmiş olan bir hidroksil (-OH) grubudur. Bu fenolik yapı, bileşiğin sadece farmakokinetik emilimini artırmakla kalmaz, aynı zamanda sulu çözeltilerdeki çözünürlük ve polarite dengesini de belirler (de Marco vd., 2017). Adsorpsiyon mekanizmaları açısından Amoksisilin'i özel kılan durum, molekülün sahip olduğu amfoterik karakterdir (Dimitrakopoulou vd., 2012). Yapısında barındırdığı amino (-NH₂), karboksil (-COOH) ve fenolik hidroksil grupları, farklı pKa değerlerine ($pK_{a1} \approx 2,4 - 2,7$ ve $pK_{a2} \approx 7,2 - 7,4$) sahiptir. Bu durum, çözeltinin pH derecesine bağlı olarak Amoksisilin'in katyonik, zwitteriyonik veya anyonik formlarda bulunabilmesine olanak tanır (Aranda ve Rivas, 2022). Özellikle Amberlyst 15 ve Amberlyst A21 gibi iyon değiştirici reçinelerle yapılan çalışmalarda, molekülün bu değişken yük dağılımı, adsorpsiyon verimliliğini ve geri kazanım potansiyelini doğrudan kontrol eden temel bir parametre olabilir (Regmi vd., 2024).

Amoksisilin'in tıp literatüründe "geniş spektrumlu" olarak tanımlanmasının ardında yatan temel neden, hem Gram-pozitif hem de birçok Gram-negatif bakterilere karşı antibakteriyel etkinlik göstermesi yer almaktadır (Arab vd., 2023). Molekül, bakteriyel hücre duvarının yapısal bütünlüğünden sorumlu olan peptidoglikan tabakasının oluşumundaki son aşamayı, yani transpeptidasyon işlemini inhibe ederek hücrenin lizis (parçalanma) sürecine girmesine neden olur (Evans vd., 2024; Kaur vd., 2011). Bu geniş etki yelpazesi, ilacın "birinci basamak tedavi" olarak seçilmesini sağlamıştır. Ancak bu yaygın kullanım, antibiyotiğin çevresel sulara karışmasına ve ekosistem üzerinde dirençli bakteri gelişimi gibi riskler oluşturmaya yol açarak, sudan geri kazanılmasına yönelik çalışmaların önemini artırmıştır (Evans vd., 2024; Kaur vd., 2011).

Çizelge 2.1. Amoksisilin'in fizikokimyasal özellikleri

Özellik	Değer / Bilgi
IUPAC Adı	(2S,5R,6R)-6-[[[(2R)-2-amino-2-(4-hidroksifenil)asetil]amino]-3,3-dimetil-7-okso-4-thia-1-azabisiklo[3.2.0]heptan-2-karboksilik asit
Molekül Formülü	C ₁₆ H ₁₉ N ₃ O ₅ S
CAS Numarası	26787-78-0 (Anhidrat)
Kimyasal Yapısı (2D)	
Kimyasal Yapısı (3D)	
Molekül Kütlesi (g/mol)	365,4
Erime Noktası (°C)	194
Suda Çözünürlük	3,43 mg/mL (25 °C, pH 6)
pKa Değerleri	pKa₁ = 2,7 (Karboksil grubu) pKa₂ = 7,4 (Amin grubu) pKa₃ = 9,6 (Fenolik hidroksil grubu)
Yük Durumu (pH'a bağlı)	Asidik pH'ta katyonik, nötr pH'ta zwitteriyonik, bazik pH'ta anyonik

2.1. Amoksisilin'in Antibakteriyel Etki Mekanizması

Amoksisilin'in antibakteriyel aktivitesi, rastgele bir inhibisyon sürecinden ziyade, bakteriyel homeostazın en kritik bileşeni olan hücre duvarı biyosentezine yönelik doğrudan bir müdahaledir. Bakteriler, sitoplazmik membranlarını yüksek iç ozmotik basınçtan korumak ve yapısal formlarını koruyabilmek adına peptidoglikan olarak bilinen, çapraz bağlı polimerik bir dış iskelete ihtiyaç duyarlar. Amoksisilin, moleküler yapısındaki aktif β -laktam halkası aracılığıyla, bu ağın sentezinde kilit rol oynayan Penisilin Bağlayıcı Proteinleri (PBP) hedef alır (Bush ve Bradford, 2016; Cho vd., 2014). Bu proteinlere geri dönüşümsüz olarak bağlanması, hücre duvarının mekanik direncini sağlayan "transpeptidasyon" (çapraz bağ oluşturma) aşamasını bloke ederek sentez sürecini kalıcı olarak sekteye uğratar (Hugonnet vd., 2016). Sürecin biyokimyasal detayları incelendiğinde, Amoksisilin'in aslında bir "moleküler taklitçi" olarak görev yaptığı görülür. Molekül, peptidoglikan sentezindeki doğal substrat olan D-Alanil-D-Alanin yapısına kimyasal olarak çok benzer bir geometriye sahiptir. Bakteriyel PBP enzimleri, bu yapısal benzerlik nedeniyle antibiyotiği kendi yapı taşı sanarak onunla kovalent bir bağ kurar; ancak bu bağ geri dönüşümsüzdür ve enzim aktivitesini tamamen yitirir (Waxman ve Strominger, 1983; Zeng ve Lin, 2013). Peptidoglikan sentezinin bu şekilde sekteye uğraması, bakteriyel hücre duvarının yapısal bütünlüğünü bozmakta ve hücre bölünmesini inhibe etmektedir. Özellikle hücre duvarı sentezinde görev alan temel PBP'lerin inhibisyonu, hücre lizisine ve sonuçta bakteriyel hücre ölümüne yol açabilmektedir (Bush ve Bradford, 2016). Amoksisilin'in klinik açıdan sergilediği yüksek güvenlik profili, bu mekanizmanın moleküler seçiciliğinden kaynaklanmaktadır. İnsan hücreleri peptidoglikan bir yapı barındırmadığı için Amoksisilin tarafından hedef alınacak bir PBP enzimine de sahip değildir; bu da ilacın sadece patojenler üzerinde yıkıcı etki yaratmasını sağlar. Ancak, günümüzde birçok bakterinin β -laktamaz enzimi üreterek bu antibiyotik halkasını parçalaması ve direnç geliştirmesi, Amoksisilin'in çevresel ortamlardan etkin bir şekilde uzaklaştırılması ve geri kazanılmasına yönelik çalışmaları (adsorpsiyon gibi) stratejik bir zorunluluk haline getirmiştir (Davies ve Davies, 2010; Etebu ve Arikekpar, 2016).

Amoksisilin'in tedavi edici gücüne karşı bakterilerin geliştirdiği en temel savunma stratejisi, β -laktamaz enzimlerinin üretimidir. Bu enzimler, Amoksisilin'in moleküler yapısının kalbi sayılan β -laktam halkasını hidroliz yoluyla parçalayarak antibiyotiği henüz hedefine ulaşmadan biyolojik olarak etkisiz hale getirir (Bush ve Bradford, 2016; Li vd., 2023). Tıpta bu direnç bariyerini aşmak amacıyla, Amoksisilin sıklıkla Klavulanik asit gibi mekanizma temelli inhibitörler (suicide inhibitors) ile kombine edilmektedir. Bu bileşikler β -laktamaz enzimlerini kalıcı olarak inaktive ederek Amoksisilin'in bakteriyel hücre duvarına yönelik etkisini sürdürmesini sağlar (Kushwaha ve Gupta, 2023). Amoksisilin-klavulanat kombinasyonu, β -

laktamaz üreten suşlardaki direnç mekanizmasını kırarak Amoksisilin'in etkinliğini genişletir; Gram-pozitif ve Gram-negatif mikroorganizmaları kapsayan daha geniş bir antimikrobiyal spektrum ortaya çıkar (Huttner vd., 2020; White vd., 2004).

2.2. Amoksisilin Kullanım Alanları

Amoksisilin, günümüzde ağız yoluyla alınan penisilin türevleri arasında en sık tercih edilen ilaçlardan biridir. Bu tercihin temel sebebi, gastrointestinal sistemden iyi absorbe edilen amoksisilin oral biyoyararlanımı %70–90 arasında olup, eşdeğer oral dozlarda ampisiline kıyasla daha yüksek plazma konsantrasyonlarına ulaşabilmektedir. Bu nedenle terapötik başarı sağlar ve bu durum hasta uyumunu artırır (Kaur vd., 2011). Amoksisilin, uygun farmakokinetik özellikleri nedeniyle menenjit dışı pnömokok enfeksiyonlarının tedavisinde seçilen oral β -laktam antibiyotiklerden biridir. Özellikle penisiline duyarlılığı azalmış *S. pneumoniae* suşlarının söz konusu olduğu durumlarda yüksek doz amoksisilin içeren tedavi rejimleri önemli bir seçenek oluşturmaktadır (Chow vd., 2012). Ampisilin ile kıyaslandığında, Amoksisilin'in gastrointestinal sistemden emilimi çok daha hızlı ve yoğun gerçekleşerek daha yüksek serum pik konsantrasyonları oluşturur (Sutherland vd., 1972). Ağır seyreden enfeksiyonlarda veya ağızdan ilaç alımının mümkün olmadığı hallerde, intravenöz uygulama tercih edilebilir (Kushwaha ve Gupta, 2023). Özetle Amoksisilin hem kullanım kolaylığı hem de solunum yolu enfeksiyonlarına yol açan zorlu bakteriler üzerindeki yüksek başarısı sayesinde klinik uygulamalarda ön plana çıkmaktadır.

Amoksisilin, geniş spektrumlu antibakteriyel etkinliği ve dokulara yüksek penetrasyon yeteneği sayesinde çok sayıda enfeksiyonun tedavisinde sıklıkla tercih edilmekte olup, bu özellikleri onu modern klinik uygulamalarda önemli bir antibiyotik haline getirmektedir.

2.2.1. Solunum yolu enfeksiyonları

Amoksisilin, üst solunum yolu enfeksiyonları arasında yer alan streptokokal farenjitin tedavisinde yaygın olarak kullanılan antibiyotiklerden biridir. Özellikle 5 ile 15 yaş arasındaki grupta sık görülen streptokokal farenjitin tedavisinde, penisilin alerjisi bulunmayan hastalar için Penisilin veya Amoksisilin ilk seçenek antibiyotikler arasında önerilmektedir (Shulman vd., 2012). Özellikle çocuklarda akut, otitis media (orta kulak iltihabı) ve akut bakteriyel sinüzit vakalarında, majör patojenler olan *Streptococcus pneumoniae* ve *Haemophilus influenzae* üzerindeki etkinliği nedeniyle ilk tercih edilen ajandır (Dharmapalan vd., 2023). Ayrıca, toplum kökenli pnömoni (zatürre) tedavisinde, ayaktan tedavi edilen hastalarda Amoksisilin, çeşitli klinik kılavuzlarda birinci basamak tedavi seçenekleri arasında önerilmektedir (File, 2003).

2.2.2. *Helicobacter pylori* eradikasyonu

Gastroenteroloji alanında Amoksisilin, mide ülserlerine ve gastrite yol açan *Helicobacter pylori* bakterisinin ortadan kaldırılmasında kritik bir rol oynar. Bu bakterinin Amoksisilin'e karşı direnç geliştirme oranı dünya genelinde hala oldukça düşüktür (%3'ün altında). Bu nedenle Amoksisilin, proton pompası inhibitörleri ve diğer antibiyotiklerle kombine edilerek hazırlanan tedavi protokollerinin vazgeçilmez bir parçasıdır (Shih vd., 2026). Ayrıca, Amoksisilin ve lansoprazol kombinasyonunu içeren tedavi rejimleri, *Helicobacter pylori* enfeksiyonu eradikasyonunda FDA tarafından onaylanmış tedavi seçenekleri arasında yer almaktadır (Matsumoto vd., 2019).

2.2.3. Ürogenital sistem enfeksiyonları

Üriner sistem enfeksiyonlarının başlıca etkeni *Escherichia coli* olmakla birlikte, *Proteus* ve *Enterococcus* türleri de enfeksiyona neden olabilmektedir. Artan antimikrobiyal direnç ise amoksisilin ampirik kullanımını sınırlandırmaktadır (Tan ve Chlebicki, 2016). İdrar yollarına iyi penetre olması ve idrarda yüksek konsantrasyona ulaşması, komplike olmayan sistit başta olmak üzere üriner sistem enfeksiyonlarındaki etkinliğinin temel nedenidir (Kushwaha ve Gupta, 2023). Amoksisilin, kadınlarda akut komplikasyonsuz idrar yolu enfeksiyonlarının tedavisinde kullanılan antibiyotiklerden biridir (Tolkoff-Rubin vd., 1984). Klinik veriler, duyarlı mikroorganizmaların neden olduğu enfeksiyonlarda Amoksisilin'in yüksek tedavi başarısı sağladığını göstermektedir.

2.2.4. Dental profilaksi ve endokardit önleme

Diş hekimliğinde uygulanan invaziv işlemler sırasında oral mikroflorada bulunan bakterilerin geçici olarak dolaşıma geçmesi, belirli risk gruplarında enfektif endokardit gelişimine zemin hazırlayabilmektedir. Bu nedenle profilaktik antibiyotik kullanımı gündeme gelmektedir. American Heart Association kılavuzlarına göre, yüksek riskli hastalarda dental girişimlerden yaklaşık 30–60 dakika önce tek doz 2 g Amoksisilin uygulanması önerilmektedir. Bu yaklaşımın, işlem sırasında ortaya çıkabilecek geçici bakteriyemiye azaltarak kalp kapakçıklarının korunmasına katkı sağladığı kabul edilmektedir (Wilson vd., 2007; Daley ve Brizuela, 2026).

2.2.5. Deri ve yumuşak doku enfeksiyonları

Amoksisilin, özellikle *Streptococcus pyogenes* ve duyarlı *Staphylococcus aureus* suşlarının neden olduğu yüzeysel ve derin deri enfeksiyonlarının yönetiminde kritik bir role sahiptir (Sartelli vd., 2018). Klinik uygulamalarda; derinin alt katmanlarını etkileyen selülit ve özellikle çocuklarda yaygın görülen, bulaşıcı bir deri hastalığı olan impetigo tedavisinde Amoksisilin/Klavulanat sistemik tedavi seçenekleri arasında yer almaktadır. (Bakhit vd., 2020;

Hartman-Adams vd., 2014). Ayrıca Amoksisilin, erizipel ve selülit gibi deri ve yumuşak doku enfeksiyonlarının tedavisinde kullanılan β -laktam antibiyotikler arasında yer almaktadır. (Sunarto ve Mappamasing, 2024). Amoksisilin'in antibakteriyel etkinliğinde, hedef mikroorganizmaya karşı minimum inhibitör konsantrasyonu olan MIC değerinin üzerinde yeterli süre boyunca kalması önemli bir farmakodinamik belirleyicidir. Uygun dozlama, ilacın MIC üzerindeki kalış süresini artırarak bakteriyel eradikasyon ve tedavi başarısına katkı sağlamaktadır (Dharmapalan vd., 2023).

2.3. Amoksisilin'in Spesifik ve Etiket Dışı (Off-Label) Kullanım Alanları

Amoksisilin, onaylanmış standart endikasyonlarının ötesinde, belirli klinik tablolarda sergilediği yüksek etkinlik sayesinde "etiket dışı" (off-label) olarak da yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Bu kullanımlar, özellikle alternatif tedavilerin riskli olduğu durumlarda hayati önem taşır.

Kene ısırığı ile bulaşan *Borrelia burgdorferi* enfeksiyonunun (Lyme hastalığı) erken evre tedavisinde Amoksisilin kritik bir alternatiftir. Özellikle doksisiklin kullanımının kontrendike olduğu hamile kadınlarda ve küçük yaş grubundaki çocuklarda birincil tedavi seçeneği olarak değerlendirilir (Chomel, 2015; Lantos vd., 2021).

Nadir görülen ancak ciddi bir granülomatöz enfeksiyon olan aktinomikozun tedavisinde Amoksisilin, uzun süreli antibiyotik rejimlerinin temel bileşenidir. Dokulara derinlemesine nüfuz edebilmesi, bu zorlu bakteriyel yapının eradikasyonunda Amoksisilin'i vazgeçilmez kılar (Bonifaz vd., 2017; Valour vd., 2014).

2.3.1. Enfeksiyöz endokardit profilaksisi

Protez kalp kapağı yada belirli konjenital kalp hastalıkları bulunan yüksek riskli bireylerde, enfektif endokardit riskini düşürmek amacıyla belirli invaziv dental işlemler öncesinde Amoksisilin profilaksisi önerilmektedir (Wilson vd., 2007; Wilson vd., 2021).

2.3.2. Periodontitis ve dental kombinasyonlar

Diş hekimliğinde, özellikle agresif periodontitis vakalarında, mikrobiyal yükü azaltmak amacıyla Amoksisilin sıklıkla metronidazol ile kombine edilerek reçete edilir. Bu sinerjik etkileşim, tek başına antibiyotik kullanımına göre daha geniş bir anaerobik spektrum sağlayarak diş eti sağlığının geri kazanılmasında yüksek başarı sunar (Teughels vd., 2020; Germack vd., 2017). Amoksisilin'in standart ve etiket dışı kullanım alanlarına ilişkin genel bir özet Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Amoksisilin'in kullanım alanları ve hedef hastalıklar

Kullanım Alanı	Hedef Hastalık / Durum
Solunum yolu enfeksiyonları	Tonsillit, farenjit, sinüzit, otitis media, toplum kökenli pnömoni
Gastrointestinal sistem	<i>H. pylori</i> eradikasyonu (ülser, gastrit)
Ürogenital sistem	Sistit, üriner sistem enfeksiyonu, gebelikte bakteriüri
Deri ve yumuşak doku	Selülit, impetigo, erizipel
Dental / kardiyoloji	Enfektif endokardit profilaksisi (invaziv işlem öncesi)
Lyme hastalığı	Erken evre <i>Borrelia burgdorferi</i> enfeksiyonu (gebelik / çocuk)
Aktinomikoz	Granülomatöz bakteriyel enfeksiyon (uzun süreli rejim)
Periodontal hastalık	Agresif periodontitis (metronidazol ile kombine)

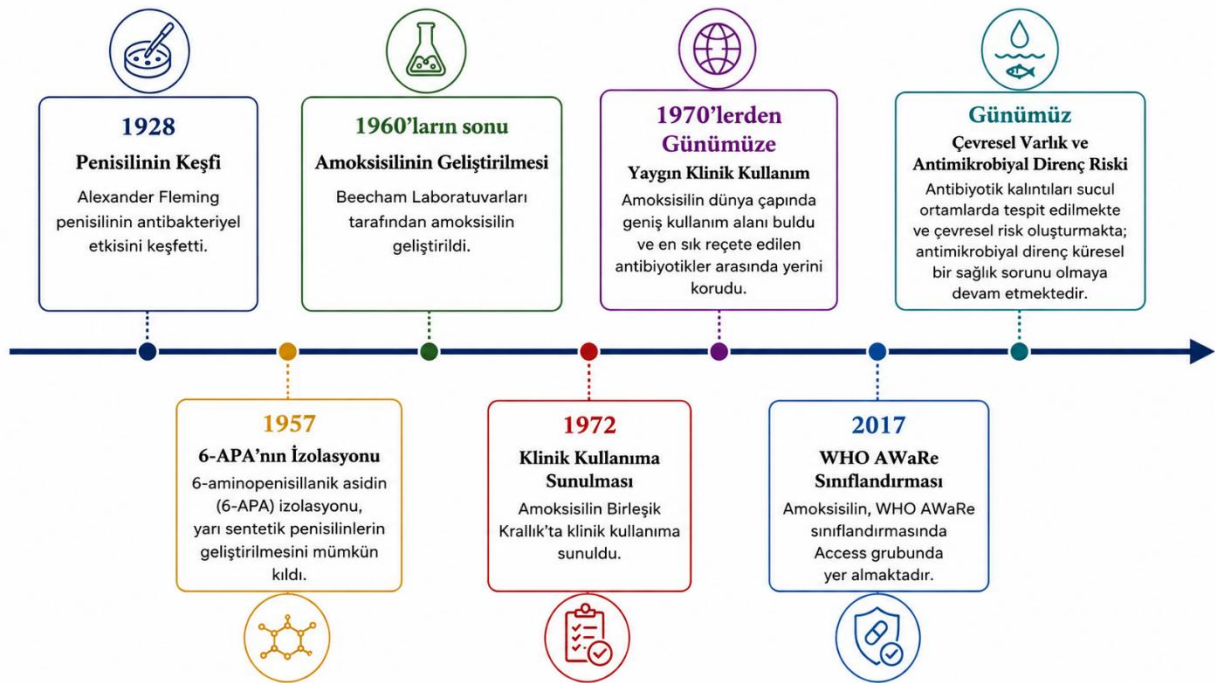
2.4. Amoksisilin'in Tarihçesi ve Keşfi

Bakteriyel enfeksiyonlar toplumda ve hastane ortamında sık karşılaşılan klinik sorunlar arasındadır. Çocukluk çağı enfeksiyonları ve antibiyotik direnci bu tablonun en zorlu boyutlarını oluşturmaktadır (Geddes vd., 2007). Gram-pozitif ve Gram-negatif bakterilerde çoklu direnç örüntülerinin yaygınlaşması mevcut tedavi seçeneklerini kısıtlamakta, kontrol güçlüğü yaşanan enfeksiyonların sıklığını artırmaktadır (Kaur vd., 2011; WHO, 2005).

Modern farmakolojinin seyri, 1928 yılında Alexander Fleming'in penisilini keşfetmesiyle köklü bir değişime uğramıştır. Alexander Fleming tarafından tesadüfen bulunan *Penicillium notatum*'un modern tıpta bir devrim yarattığı görülmektedir (Ligon, 2004). Ancak ilk nesil penisilin türevleri, özellikle dar etki spektrumları ve ağız yoluyla alındığında vücut tarafından düşük emilim göstermeleri nedeniyle klinik uygulamalarda belirli kısıtlamalarla karşılaşmıştır (Sutherland vd., 1972). 20. yüzyılın ortalarına gelindiğinde araştırmacılar, mide asidine dayanıklı ve daha geniş bir bakteri yelpazesini hedefleyebilen yarı sentetik analoglar geliştirmeye odaklanmıştır (Kaur vd., 2011).

Amoksisilin, ilk kez Beecham Araştırma Laboratuvarları'ndaki bilim insanları tarafından sentezlenmiştir. Bu yeni bileşik, dönemin ilk önemli yarı sentetik penisilini olan Ampisiline benzer bir antibakteriyel etki spektrumuna sahip olmakla birlikte, oral uygulama sonrasında daha iyi absorbe olmakta ve benzer dozlarda Ampisilin'e kıyasla yaklaşık iki kat daha yüksek serum konsantrasyonlarına ulaşmaktadır (Sutherland vd., 1972).

Araştırmacılar ampisilin molekülünün fenil yan zincirine hidroksil grubu ekleyerek Amoksisilin'i geliştirmiş; bu değişiklik daha yüksek biyoyararlanım ve oral emilim sağlayan bir bileşik ortaya çıkarmıştır (de Marco vd., 2017). Klinik çalışmaların ardından Amoksisilin 1972'de Birleşik Krallık'ta onaylanmış, kısa sürede küresel kullanıma girmiştir (Kaur vd., 2011). O tarihten bu yana en sık reçete edilen antibiyotikler arasındaki yerini korumaktadır. Ne var ki bu yoğun ve kesintisiz kullanım olumsuz sonuçlara da neden olmuştur; metabolize olmadan atılan ilaç fraksiyonları ve üretim atıkları on yıllardır kanalizasyon yoluyla sucul ekosistemlere ulaşmaktadır (Heberer, 2002). Biriken bu kirlilik yükü, konvansiyonel arıtma yöntemlerinin yetersiz kaldığı ekotoksikolojik riskleri beraberinde getirmiştir. Amoksisilin'in keşfinden günümüze kadar gelen süreç Şekil 2.1. de özetlenmiştir.



Şekil 2.1. Amoksisilin'in keşif süreci

Çizelge 2.3. Amoksisilin'in ilaç profili

Özellik	Açıklama	Referans
Etken Madde	Amoksisilin	
İlaç Grubu	Yarı sentetik, β -laktam antibiyotik (Aminopenisilin grubu)	(Huttner vd., 2020)
Etki Mekanizması	Amoksisilin, bakteri hücre duvarı sentezinden sorumlu penisilin bağlayıcı proteinlere (PBP) kovalent olarak bağlanır; bu bağlanma peptidoglikan çapraz bağlanmasını engeller ve bakterisidal etki ortaya çıkar.	(Bush ve Bradford, 2016)
Bozunma Mekanizması	Sulu ortamlarda kararsızdır; yüksek sıcaklık ve aşırı asidik, aşırı bazik pH değerleri bozunmayı hızlandırabilir. Bozunma ürünleri arasında Amoksisiloik asit ve Diketopiperazin Amoksisilin yer almakta olup bu ürünlerin alerjik reaksiyon riski taşıyabileceği bildirilmektedir	(Binson vd., 2019; Brouwers vd., 2020)
Farmasötik form	Tablet, kapsül, oral süspansiyon, enjeksiyonluk formülasyonlar	(Montanha vd., 2019)
Uygulama Yolu	Ağızdan veya intravenöz	(Montanha vd., 2019)

Yetişkin Dozu	250–500 mg 8 saatte bir veya 500–875 mg 12 saatte bir (enfeksiyonun türü ve şiddetine göre değişir)	(DailyMed, t.y.)
Çocuk Dozu	Vücut ağırlığına göre hesaplanır	(DailyMed, t.y.)
Yarı Ömrü	Yaklaşık 1–1,5 saat (Eğer böbrek yetmezliği gibi bir durum varsa süre artabilir.)	(Humbert vd., 1979)
Proteinlere Bağlanma	Yaklaşık %20	(Akhavan vd., 2023)
Farmakokinetik	Absorpsiyon: Oral biyoyararlanımı yüksektir (%70–90). Dağılım: Vücut doku ve sıvılarına iyi dağılır. Eliminasyon: Büyük oranda böbrekler yoluyla değişmeden atılır.	(Kaur vd., 2011; Kushwaha ve Gupta, 2023)
Metabolizma	Kısmen metabolize edilir (oksidasyon, hidroksilasyon ve deaminasyon).	(Akhavan vd., 2023)
Kullanım Alanları	Tonsilit, sinüzit, orta kulak iltihabı, bronşit, pnömoni ve sistit, deri ve yumuşak doku enfeksiyonları gibi enfeksiyonlar.	(Akhavan vd., 2023)
Yan Etkiler	Bulantı, kusma, ishal, deri döküntüleri ve kandidiyazis	(Gillies vd., 2015)

Ciddi Yan Etkiler	Anafilaksi, psödomembranöz kolit, Stevens-Johnson sendromu (Fda, 2015)
Kontrendikasyonlar	Penisilinlere veya diğer β -laktam antibiyotiklere karşı ciddi aşırı duyarlılık öyküsü (Felix vd., 2021)
İlaç Etkileşimleri	Allopurinol (döküntü riskini artırır), varfarin (kanama riskini artırır), metotreksat (toksisitesini artırır), (Fda, 2015) probenesid (atılımı yavaşlatır), oral kontraseptifler (etkinliği azaltabilir)
Saklama Koşulları	Oda sıcaklığında (25 °C) veya buzdolabında (2–8 °C) saklanmalıdır. (Obat vd., 2022)
Gebelikte Kullanımı	FDA gebelik kategorisi B (2015 öncesi sınıflandırma); (Bookstaver vd., 2015) hayvan çalışmalarında fetüse zararlı etkisi gözlemlenmemiştir.

2.5. Amoksisilin'in Diğer Canlılar Üzerindeki Ekolojik Etkileri

Antibiyotiklerin sadece hedef organizmalar üzerinde değil, aynı zamanda çevresel alıcı ortamlardaki hedef dışı canlılar üzerinde de baskı oluşturduğu bilinmektedir (Roushree & Haimbodi, 2025). Geniş spektrumlu bir penisilin türevi olan Amoksisilin, sucul sistemlere ulaştığında fitoplanktonlardan balıklara kadar geniş bir yelpazede biyolojik değişimlere neden olabilmektedir.

2.5.1. Sucul organizmalar ve fitoplanktonlar üzerindeki toksisite

Sucul ekosistemin temel üreticileri olan algler ve siyanobakteriler, Amoksisilin'e karşı oldukça hassastır (Park & Choi, 2008). Yapılan çalışmalar, Amoksisilin'in özellikle *Synechococcus leopoliensis* gibi siyanobakteri türlerinde büyüme inhibisyonuna yol açtığını göstermektedir. Bu durum, besin zincirinin en alt basamağında meydana gelen bir kırılmanın, tüm

ekosistem dengesini bozma potansiyelini taşımaktadır. Ayrıca, düşük konsantrasyonlarda bile uzun süreli maruziyetin, sucul bitkilerin klorofil sentezi üzerinde olumsuz etkiler yarattığı gözlemlenmiştir (González-Pleiter vd., 2013).

2.5.2. Omurgasızlar ve balıklar üzerindeki fizyolojik etkiler

Amoksisilin, *Daphnia magna* (su piresi) gibi model organizmalarda akut toksisiteye nadiren neden olsa da, kronik maruziyet üreme oranlarında düşüşe ve yaşam süresinde kısalmaya yol açabilmektedir. Balıklar üzerinde yapılan araştırmalarda ise, antibiyotik kalıntılarının karaciğer dokusunda oksidatif strese neden olduğu ve bağışıklık sistemini baskıladığı tespit edilmiştir. Bu durum, balıkların doğal patojenlere karşı daha savunmasız hale gelmesine sebebiyet vermektedir. (Park & Choi, 2008).

2.5.3. Toprak canlıları ve mikrobiyal çeşitlilik

Arıtma çamurlarının tarımda kullanılması, Amoksisilin gibi antibiyotiklerin toprak ekosistemine sızmasına neden olan temel yollardan biridir. Toprak ortamına giren Amoksisilin, mikrobiyal toplulukların yapısını ve fonksiyonel kapasitesini önemli ölçüde değiştirebilir. Araştırmalar, Amoksisilin'in toprak mikrobiyal biyokütle karbonunu (MBC) baskıladığını ve özellikle azot döngüsünde görev alan bakterilerin aktivitesini kısıtlayarak toprak verimliliğini riske attığını göstermektedir (Rodríguez-González vd., 2022).

2.6. Amoksisilin Maddesinin Adsorbentlerle Gideriminde Literatürden Örnekler

Günümüzde antibiyotiklerin hem beşerî tıpta hem de hayvancılık sektöründe kontrolsüz ve yoğun kullanımı, bu bileşiklerin su kaynaklarına karışarak ekosistem üzerinde ciddi bir tehdit oluşturmaya neden olmuştur. Özellikle en yaygın kullanılan antibiyotik gruplarından biri olan Amoksisilin, geleneksel arıtma yöntemleriyle tamamen giderilememesi nedeniyle su ortamlarında kalıcı kirlilik yaratan öncelikli kirleticiler arasında yer almaktadır. Bu kirliliğin bertaraf edilmesinde yüksek verimliliği ve uygulama kolaylığı ile öne çıkan adsorpsiyon tekniği, kullanılan adsorbentin türüne ve ekonomik maliyetine bağlı olarak geliştirilmeye açık bir alandır. Bu bağlamda, Amoksisilin'in sulu ortamlardan uzaklaştırılması amacıyla literatürde yer alan farklı adsorbent stratejilerini inceleyen çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Mosavi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Amoksisilin antibiyotiğinin su ortamından giderilmesi amacıyla karboksimetil kitre zambakı-polianilin yapısına manyetik demir oksit entegre ederek CMT-g-PANI@Fe₂O₃ bionanokompozitini geliştirmişlerdir. Isıl kararlılığı ve 25 emu/g manyetik özelliğiyle dikkat çeken bu granüler adsorbent, dış bir manyetik alan yardımıyla sudan pratik bir şekilde geri kazanılabilmektedir. Çalışmada elde edilen veriler; nötr pH koşullarında ve 20 dakika gibi kısa bir sürede 909,09 mg/g'lık üst düzey bir adsorpsiyon

kapasitesine ulaşıldığını ortaya koymuştur. Kinetik verilerin yalancı ikinci derece, izoterm verilerinin ise Freundlich modeliyle uyumlu olduğu süreçte; tutunma mekanizmasının π - π etkileşimleri, hidrojen bağları ve elektrostatik kuvvetler aracılığıyla gerçekleştiği rapor edilmiştir. Ek olarak, materyalin üç kez üst üste kullanımda dahi verimliliğini muhafaza etmesi, ekonomik ve sürdürülebilir bir seçenek olduğunu göstermektedir (Mosavi vd., 2023).

2017 yılında Arun ve ekip arkadaşları tarafından yapılan evsel atıksu arıtma tesisi amurlarının katma değerli bir ürüne dönüştürölmesini hedefleyen bir çalışmada, 300°C sıcaklıkta üretilen biyokömürün Amoksisilin giderimindeki performansı analiz edilmiştir. Araştırma kapsamında, 100 mg/L derişimindeki antibiyotik çözeltisiyle etkileşime giren biyokömürün, 180 dakikalık süreçte tutarlı bir adsorpsiyon eğilimi sergilediği görölmüştür. Çalışmada spesifik bir yüzde oranı rapor edilmemiş olsa da, Amoksisilin moleküllerinin biyokömür yapısında yarattığı morfolojik değişimler SEM analizleri aracılığıyla görselleştirilmiş ve UV spektrofotometre ölçümlerindeki düzenli düşüş grafikleriyle sürecin etkinliği doğrulanmıştır. Arıtma amurlarının kurutulup 300 °C’de piroliz edilerek biyokömüre dönüştüröldüğü bu yöntem, çevresel kirliliğin kontrol altına alınmasının yanı sıra, atık sahalarındaki çamur yükünü hafifletecek ekonomik bir model olarak önerilmektedir (Arun vd., 2017).

Amoksisilin antibiyotiğinin su sistemlerinden temizlenmesi üzerine yapılan bir çalışmada, NH₄Cl ile aktive edilmiş tarımsal atık bazlı aktif karbonun (NAC) adsorpsiyon potansiyeli, ticari standart aktif karbon (SAC) ile kıyaslanmıştır. Moussavi ve ekibi tarafından gerçekleştirilen analizler, NAC’ın 1029 m²/g yüzey alanı ve zengin yüzey fonksiyonel grupları sayesinde, Amoksisilin gideriminde standart örneklere göre daha yüksek bir maksimum adsorpsiyon kapasitesi (yaklaşık 437 mg/g) sergilediğini ortaya koymuştur. Optimum pH 6 koşullarında %99’u aşan bir giderim verimliliğine ulaşılan çalışmada, sürecin Langmuir izotermine ve yalancı ikinci derece kinetiğe uygun olarak gerçekleştiği saptanmıştır. Özellikle mezogözenekli yapısı ve yüksek gözenek hacmiyle öne çıkan bu düşük maliyetli adsorbentin, su kirliliğinin kontrolünde standart ticari karbonlara göre çok daha ekonomik ve verimli bir alternatif sunduğu vurgulanmıştır (Moussavi vd., 2013).

Bir diğer çalışmada, kahve atıklarının kimyasal aktivasyonu ile elde edilen aktif karbonun Amoksisilin antibiyotiğini sudan uzaklaştırma potansiyeli değerlendirilmiştir. Laksaci ve ekibi, 800°C’de KOH ile aktive edilen bu materyalin, 370 mg/g maksimum tutunma kapasitesiyle ticari muadillerine göre daha üstün bir performans sergilediğini rapor etmişlerdir. pH değişimlerinin adsorpsiyon üzerinde kritik bir rol oynadığı ve bazik koşulların (pH > 10) giderimi desteklediği saptanan araştırmada, iyonik şiddetin kapasiteyi etkilemediği görölmüştür. Termodinamik veriler, Amoksisilin moleküllerinin yüzeye tutunmasının dışarıya ısı veren (ekzotermik) ve doğal olarak

kendiliğinden ilerleyen bir yapıda olduğunu doğrulamıştır. Geri kazanım testlerinde, dört kullanım aşamasından sonra bile kapasitesinin büyük bir kısmını koruyan bu düşük maliyetli adsorbentin, antibiyotik içeren atıksuların arıtılmasında sürdürülebilir bir seçenek olduğu vurgulanmıştır (Laksaci vd., 2023).

Amoksisilin antibiyotiğinin su ortamlarından uzaklaştırılmasına yönelik bir araştırmada, zeytin çekirdeği atıklarından sonokimyasal yöntemle üretilen manyetik bir kompozit adsorbentin etkinliği incelenmiştir. Jafari ve ekibi tarafından yürütülen çalışmada, Fe_3O_4 nanopartikülleri ile modifiye edilen bu materyalin, $2188 \text{ m}^2/\text{g}$ düzeyindeki çok geniş yüzey alanı sayesinde Amoksisilin moleküllerini tutmada yüksek bir afinite sergilediği bildirilmiştir. Nötr pH'a yakın koşullarda (pH 6) gerçekleştirilen kesikli deneylerde, Langmuir modeline göre $238,1 \text{ mg/g}$ maksimum kapasite elde edilmiş ve sürecin homojen, tek tabakalı bir tutunma mekanizması izlediği saptanmıştır. Özellikle hastane atıksuları gibi karmaşık ortamlarda da başarılı sonuçlar veren bu yöntemin, tarımsal atıkları katma değerli ve ekonomik bir arıtma materyaline dönüştürmesi açısından sürdürülebilir bir çözüm sunduğu vurgulanmıştır (Jafari vd., 2018).

Bir diğer araştırmada, Amoksisilin antibiyotiğinin sudan uzaklaştırılması amacıyla ekonomik ve doğal bir alternatif olan kaolinit kilinin adsorpsiyon performansı analiz edilmiştir. El Azzouzi ve ekibi tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 26 mg/g düzeyinde bir maksimum adsorpsiyon kapasitesine ulaşılmış ve en yüksek verimin hafif asidik (pH 5,33) ortamda elde edildiği rapor edilmiştir. Sürecin sıcaklık artışıyla negatif etkilenmesi, adsorpsiyonun doğası hakkında önemli veriler sunarken; kinetik çalışmaların yalancı birinci derece modelle uyum sergilemesi dikkat çekicidir. Heterojen bir yüzey tutunmasına işaret eden Freundlich izotermine baskın olduğu bu çalışma, kaolinit kilinin modifiye edilmeden dahi çevresel kirleticilerin uzaklaştırılmasında düşük maliyetli ve çevre dostu bir adsorbent olarak kullanılabileceğini kanıtlamıştır (El Azzouzi vd., 2022).

Karbon tabanlı nanoyapıların antibiyotik giderimindeki rolünü araştıran bir çalışmada, çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT) Amoksisilin adsorpsiyon potansiyeli test edilmiştir. Mohammadi ve ekibi tarafından yürütülen araştırmada, MWCNT'nin sunduğu performans fulleren C60 ve klasik aktif karbon örnekleriyle karşılaştırılmış; nanotüp yapısının diğer adsorbentlere oranla çok daha üstün bir tutunma kabiliyeti sergilediği bildirilmiştir. Sürekli sistemde %87,9'a varan bir giderim başarısının kaydedildiği çalışmada, maksimum adsorpsiyon kapasitesi $22,9 \text{ mg/g}$ olarak hesaplanmıştır. En uygun pH değerinin 4,6 olarak saptandığı süreçte, denge verilerinin Langmuir izoterm modeline en iyi uyumu gösterdiği ve adsorpsiyonun tek tabakalı karakterde olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, MWCNT'nin su arıtma teknolojilerinde

yüksek verimli bir nano-adsorbent olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Mohammadi vd., 2015).

Antibiyotik kirliliğiyle mücadelede organo-kil minerallerinin etkinliğinin incelendiği bir araştırmada, hegzadesil trimetil amonyum ile modifiye edilen bentonitin (DK1) Amoksisilin giderim performansı değerlendirilmiştir. Zha ve ekibi tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 20°C sıcaklıkta 26,18 mg/g adsorpsiyon kapasitesine ulaşılmış ve sürecin Langmuir izotermine uygun şekilde gerçekleştiği bildirilmiştir. Diğer pek çok çalışmanın aksine, bu adsorpsiyon sürecinin endotermik bir doğaya sahip olduğu ve yüksek sıcaklıklarda daha verimli hale geldiği saptanmıştır. Mekanizmanın temelinde iyon değişimi ve tabakalar arası partiyon süreçlerinin yer aldığı belirtilen çalışmada, modifiye bentonitin atıksu örneklerinde %87,5'e varan giderim oranları sergilediği kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, düşük maliyetli killerin kimyasal modifikasyonla spesifik kirleticiler için yüksek performanslı adsorbentlere dönüştürülebileceğini göstermektedir (Zha vd., 2013).

Amoksisilin antibiyotiğinin giderimine yönelik farklı bir yaklaşımın ele alındığı araştırmada, anyonik bir sürfaktan olan sodyum dodesil sülfat (SDS) kullanılmış ve adsorpsiyon performansı analiz edilmiştir. Boukhelkhal ve ekibi tarafından yürütülen çalışmada, 50°C sıcaklık ve pH 4 gibi spesifik koşullarda %87,7'lik bir maksimum giderim başarısı kaydedilmiştir. Adsorpsiyon kinetiğinin yalancı birinci derece modelle, denge verilerinin ise Freundlich denkleminle yüksek korelasyon sergilediği saptanmıştır. Sürecin termodinamik parametreleri, Amoksisilin transferinin ekzotermik ve kendiliğinden ilerleyen bir fenomen olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma, anyonik bir sürfaktan olan SDS'ye dayalı ayırma yönteminin, Amoksisilin'in sulu çözeltilerden uzaklaştırılmasında uygulanabilir bir alternatif oluşturabileceğini göstermektedir (Boukhelkhal vd., 2015).

Pirinç kabuğu atıklarından ileri teknolojiyle üretilen biyo-silika nanopartiküllerin Amoksisilin eliminasyonundaki rolü üzerine yapılan bir araştırmada, sürdürülebilir ve verimli bir adsorpsiyon stratejisi geliştirilmiştir. Elnazer ve ekibi, sol-gel metoduyla elde edilen ve 600°C'ye kadar termal kararlılık gösteren bu nanopartiküllerin, 99,8 mg/g maksimum adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Langmuir ve Temkin izoterm modellerinin süreci başarıyla açıkladığı çalışmada, adsorpsiyonun sıcaklık artışıyla desteklenen (endotermik) bir karakter sergilediği saptanmıştır. Özellikle aseton kullanılarak gerçekleştirilen desorpsiyon işlemlerinde elde edilen yüksek geri kazanım başarısı ve 6 kullanım döngüsü sonrasında dahi korunan yapısal stabilite, bu biyo-sentezlenmiş materyalin endüstriyel atıksu arıtımı için ekonomik ve dayanıklı bir aday olduğunu ortaya koymuştur (Elnazer vd., 2024).

Agroendüstriyel atıkların su arıtma süreçlerine kazandırılması amacıyla yapılan bir araştırmada, Brezilya fındığı kapsüllerinden kimyasal aktivasyonla üretilen aktif karbonların Amoksisilin üzerindeki adsorpsiyon gücü test edilmiştir. Lima ve ekibi, piroliz sıcaklığının 600-700°C fiziksel özellikler üzerinde büyük bir değişim yaratmadığını, her iki sıcaklıkta da 1400 m²/g'ı aşan yüksek yüzey alanına ulaşıldığını bildirmişlerdir. Literatürde yaygın kullanılan modellerin ötesinde, adsorpsiyon kinetiğinin Avrami kesirli dereceli modeli ile, denge verilerinin ise Liu izoterm modeli ile en iyi şekilde açıklandığı çalışmada, 45 °C'de 454,7 mg/g'a ulaşan maksimum adsorpsiyon kapasitesi elde edilmiştir. Özellikle laboratuvar ortamında hazırlanan hastane atıksu simülasyonlarında %98'i aşan giderim oranları, bu biyo-atık kaynaklı karbonların farmasötik kirlilikle mücadelede son derece verimli bir seçenek olduğunu kanıtlamaktadır (Lima vd., 2019).

Modern su arıtma teknolojilerinde sürdürülebilir çözümlere duyulan ihtiyaç doğrultusunda yapılan bir araştırmada, bitkisel kaynaklı silikadan üretilen amino ve fenil fonksiyonlu oyuk silika kürelerin (AP-NHSS) Amoksisilin üzerindeki performansı değerlendirilmiştir. Alshehri ve ekibi tarafından 2025 yılında rapor edilen bu çalışmada, yeşil sentez yöntemleriyle elde edilen adsorbentin 384,6 mg/g gibi yüksek bir tutunma kapasitesine sahip olduğu bildirilmiştir. Yüzey kontrollü kinetik ve tek tabakalı adsorpsiyon mekanizmasının (Langmuir) baskın olduğu süreçte, Amoksisilin moleküllerinin yüzeye bağlanmasında hidrojen bağları ve π - π etkileşimlerinin kritik rol oynadığı saptanmıştır. Özellikle 10 ardışık kullanım döngüsü sonucunda dahi %96,4 oranında kapasite korunumu ve %97,6 desorpsiyon verimliliği sunan bu materyal, su arıtımı ve çevresel iyileştirme uygulamaları için çevre dostu ve yüksek performanslı bir adsorbent adayı olarak öne çıkmaktadır (Alshehri vd., 2025).

Farmasötik kirliliğin giderilmesinde biyolojik materyallerin kullanımını ele alan bir araştırmada, *Saccharomyces cerevisiae* (ekmek mayası) bazlı bir biyo-adsorbentin Amoksisilin üzerindeki tutma kapasitesi incelenmiştir. Samarghandi ve ekibi tarafından gerçekleştirilen analizlerde, optimize edilmiş koşullarda (pH 5 ve 90-120 dk temas süresi) %93 gibi yüksek bir eliminasyon verimliliğine ulaşıldığı bildirilmiştir. Heterojen bir yüzey adsorpsiyonuna işaret eden Freundlich izoterm modelinin baskın olduğu süreçte, kinetik verilerin yalancı ikinci derece modele uygunluk gösterdiği saptanmıştır. Termodinamik değerlendirmeler sonucunda adsorpsiyon sürecinin endotermik karakter gösterdiği bildirilmiştir. Bu çalışma, mikroorganizma bazlı adsorbentlerin, konvansiyonel arıtma ünitelerine girmeden önce atıksu yükünü azaltmak amacıyla düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir alternatif olarak uygulanabileceğini ortaya koymuştur (Samarghandi vd., 2019).

Bir diğerk çalışmada, karbon nanofiberlerin çinko oksit ile modifiye edilmesiyle elde edilen ZnO@CNF nanokompozitinin Amoksisilin üzerindeki adsorpsiyon etkinliğı incelenmiştir. Chaba ve Nomngongo tarafından gerçekleştirilen araştırmada, adsorpsiyon koşullarının optimizasyonu için merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılmış ve 156 mg/g düzeyinde bir maksimum kapasite kaydedilmiştir. Adsorpsiyon mekanizmasının Langmuir izoterm modeline ve yalancı ikinci derece kinetik modele tam uyum gösterdiği saptanmış, bu da sürecin homojen yüzey etkileşimleri üzerinden şekillendiğine işaret etmiştir. Özellikle gerçek atıksu örneklerindeki başarısı ve 15 ardışık kullanım döngüsü sonrasında dahi sergilediğı yüksek stabilite, ZnO@CNF kompozitini sürdürülebilir su arıtma uygulamaları için umut verici bir materyal haline getirmektedir (Chaba ve Nomngongo, 2019).

Tarımsal atıkların ileri teknolojiyle modifikasyonunu ele alan bir araştırmada, antep fıstığı kabuklarının çinko oksit (ZnO) nanopartikülleri ile kaplanmasıyla elde edilen nanokompozitin (CPS) Amoksisilin adsorpsiyonundaki performansı incelenmiştir. Mohammed ve ekibi, hem kesikli hem de sürekli akışlı reaktör sistemlerinde yürüttükleri çalışmada, adsorpsiyon verimliliğinin ortamın asiditesine karşı oldukça duyarlı olduğunu saptamışlardır. Kesikli sistem deneylerinde; pH 5 ortam asiditesi, 150 rpm karıştırma hızı ve 0,08 g/100 mL adsorbent dozajı optimum işletme koşulları olarak belirlenmiş ve bu şartlar altında Langmuir modeline göre 163 mg/g düzeyinde bir maksimum tutunma kapasitesine ulaşılmıştır. Kinetik verilerin yalancı ikinci derece modele yüksek uyum sağladığı araştırmada, hız sınırlayıcı basamağın tanecik içi difüzyondan ziyade sınır tabaka difüzyonu olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın özgün bir parçası olan sirkülasyonlu akışkan yataklı reaktör denemeleri ise sıvı akış hızı ve yatak yüksekliğı gibi operasyonel faktörlerin dinamik sistemlerdeki kritik rolünü ortaya koymuştur. Sıcaklık artışıyla adsorpsiyon kapasitesinin azaldığını ve sürecin ekzotermik bir doğaya sahip olduğunu rapor eden bu çalışma, CPS materyalinin endüstriyel ölçekli sürekli arıtma sistemlerinde Amoksisilin eliminasyonu için etkin ve sürdürülebilir bir aday olduğunu kanıtlamıştır (Mohammed vd., 2022).

Sürdürülebilir biyokütle kaynaklarının hızlı aktivasyon yöntemleriyle işlenmesini konu alan bir araştırmada, *Arundo donax Linn* (dev kamış) bitkisinden mikrodalga enerjisi ve KOH aktivasyonu kullanılarak üretilen aktif karbonun Amoksisilin giderimindeki etkinliğı değerlendirilmiştir. Chayid ve ekibi tarafından yürütölen çalışmada, geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha kısa bir sürede (10 dakika) ve 620 W radyasyon gücünde yüksek gözenekliliğıne sahip adsorbent elde edildiğı rapor edilmiştir. Sips izoterm modeline göre maksimum 345,4 mg/g adsorpsiyon kapasitesine ulaşılan süreçte, kinetik verilerin yalancı ikinci derece modele uygunluk sergilediğı saptanmıştır. Adsorpsiyon entalpisinin 17,7 kJ/mol olarak hesaplanması, sürecin endotermik bir doğaya sahip olduğunu ve temel olarak fiziksel adsorpsiyon mekanizmalarıyla

gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, mikrodalga destekli sentezin, farmasötik kirlilikle mücadelede düşük maliyetli ve yüksek performanslı adsorbent üretiminde zaman tasarrufu sağlayan etkili bir alternatif olduğunu kanıtlamaktadır (Chayid ve Ahmed, 2015).

Tarımsal atıkların nanopartikül düzeyinde işlenerek su arıtımında kullanımını konu alan bir araştırmada, asma odunu atıklarından sentezlenen aktif karbonun Amoksisilin dahil olmak üzere çeşitli antibiyotik grupları üzerindeki adsorpsiyon kapasitesi incelenmiştir. Pouretedal ve Sadegh tarafından yürütülen çalışmada, farklı kimyasal aktivasyon süreçleri karşılaştırılmış ve NaOH aktivasyonunun etkin, düşük maliyetli ve çevre açısından uygun bir yöntem olduğu belirlenmiştir. pH 2 gibi oldukça asidik bir ortamda ve 8 saatlik bir denge süresinde optimize edilen süreçte, adsorpsiyon mekanizmasının Langmuir izotermine ve ikinci derece kinetik modellere tam uyum gösterdiği saptanmıştır. Termodinamik bulgular sürecin endotermik karakterini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca adsorbentin yeniden kullanılabilirliği, Penisilin G ile gerçekleştirilen rejenerasyon deneylerinde %5'lik NaOH çözeltisi kullanılarak değerlendirilmiştir. Asma odunu bazlı bu karbonun ticari grafit ve nanotüp bazlı pahalı adsorbentlere karşı maliyet etkin bir alternatif olduğunu kanıtlamıştır (Pouretedal ve Sadegh, 2014).

Biyopolimer temelli adsorbent türlerinin farmasötiklerin giderimindeki davranışlarını ele alan bir araştırmada, Adriano vd. (2005), kitosan boncuklar üzerine Amoksisilin adsorpsiyonunun denge ve kinetik özelliklerini deneysel ve matematiksel olarak incelemişlerdir. Adsorpsiyon denge verilerinin Langmuir izoterm modeliyle yüksek oranda uyum gösterdiği ve maksimum adsorpsiyon kapasitesinin 8,71 mg/g olduğu belirtilmiştir. Adsorpsiyon kinetiğinin değerlendirilmesinde basitleştirilmiş ve kapsamlı olmak üzere iki matematiksel model kullanılmış; kapsamlı model aracılığıyla kitosan boncuklarındaki iç difüzyon ve dış kütle transferine ilişkin parametreler değerlendirilmiştir. Her iki modelin de deneysel verilerle iyi uyum göstermesi sonucunda, söz konusu modellerin β -laktam antibiyotiklerin kesikli karıştırmalı sistemlerdeki adsorpsiyon hızlarının tahmin edilmesinde kullanılabileceği bildirilmiştir (Adriano vd., 2005).

Doğal tarım ürünlerinin kimyasal modifikasyon yoluyla çevre teknolojilerine kazandırılmasını konu alan bir araştırmada, tartarik asit ile işlevselleştirilmiş buğday tanelerinin Amoksisilin adsorpsiyonundaki performansı incelenmiştir. Boukhelkhal ve ekibi tarafından yürütülen çalışmada, nötr pH koşullarında (pH 7), 25°C sıcaklıkta ve 150 μ m partikül boyutunda gerçekleştirilen kesikli sistem deneylerinde %84 oranında bir giderim verimine ulaşıldığı rapor edilmiştir. Sadece 5 dakika içerisinde dengeye ulaşılan süreçte, kütle transfer sürecinin iki-film teorisine dayalı model ile başarılı bir şekilde açıklanabildiği belirlenmiştir. Temkin izoterm modeliyle yüksek uyum sergileyen ve yalancı ikinci derece kinetiğin baskın olduğu bu ekzotermik

sistem, buğday taneleri gibi erişilebilir doğal kaynakların, farmasötik atıkların sudan uzaklaştırılmasında hızlı ve sürdürülebilir bir alternatif olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Boukhelkhal vd., 2016).

Sucul bir bitki türü olan *Azolla filiculoides* kullanılarak sentezlenen aktif karbonun, ilaç sanayi kaynaklı atıksulardan Amoksisilin eliminasyonundaki etkinliği araştırılmıştır. Balarak ve ekibi tarafından yürütülen çalışmada, adsorbent dozunun 0,15 g/L'den 0,60 g/L'ye yükseltilmesinin giderim verimliliğini %49'dan %90 seviyesine çıkardığı saptanmıştır. Langmuir izoterm modeline göre maksimum 265,2 mg/g kapasiteye ulaşılan süreçte, kinetik verilerin yalancı ikinci derece modelle yüksek korelasyon sergilediği rapor edilmiştir. Çalışmanın termodinamik bulguları, özellikle D-R izoterminden hesaplanan düşük serbest enerji değeri 5,95 kJ/mol, Amoksisilin tutunumunun temel olarak fiziksel adsorpsiyon mekanizmalarıyla gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Bu araştırma, *Azolla filiculoides*'ten elde edilen aktif karbonun, Amoksisilin içeren sulu ortamların arıtımında yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip alternatif bir adsorbent olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Balarak vd., 2017).

Aktif karbonun farmasötik giderimindeki endüstriyel uygulanabilirliğini değerlendiren bir çalışmada, Amoksisilin adsorpsiyonu sürekli akışlı sabit yataklı kolon sistemlerinde analiz edilmiştir. Espina de Franco ve ekibi tarafından gerçekleştirilen çalışmada, operasyonel parametrelerin (akış hızı, giriş konsantrasyonu ve yatak yüksekliği) sistemin kırılma ve doygunluk süreleri üzerindeki etkisi faktöriyel deneysel tasarım yöntemiyle saptanmıştır. Kesikli sistemlerde Sips izoterm modelinin baskın olduğu süreçte, kolon performansının tahmin edilmesinde Yan modelinin en yüksek korelasyonu sergilediği rapor edilmiştir. Çalışma, özellikle düşük akış hızları ve yüksek adsorbent dozajlarının kırılma süresini uzatarak operasyonel verimliliği artırdığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, laboratuvar ölçekli verilerin gerçek ölçekli arıtma sistemlerine ölçeklendirilmesi ve kırılma eğrilerinin matematiksel öngörüsü açısından stratejik bir temel sunmaktadır (Espina de Franco vd., 2017).

Karbon bazlı nanoyapıların manyetik modifikasyon yoluyla su arıtımında kullanımını ele alan bir çalışmada, grafen oksit (GO) ve manyetik grafen oksit (MGO) kompozitlerinin Amoksisilin üzerindeki adsorpsiyon potansiyeli karşılaştırılmıştır. Moradi tarafından gerçekleştirilen çalışmada, manyetik özellik kazandırılan adsorbentlerin sadece yüksek kapasite sunmakla kalmadığı, aynı zamanda işlem sonunda sulu çözeltiden kolayca ayrılabilir olması nedeniyle pratik bir uygulama avantajı sağladığı vurgulanmıştır. 0,1 g/L gibi oldukça düşük bir dozajda ve hafif asidik ortamda (pH 6) optimize edilen süreçte, denge verilerinin Langmuir modeline, kinetik verilerin ise yalancı ikinci derece modele yüksek korelasyonla uyduğu saptanmıştır. Bu çalışma, grafen bazlı manyetik nanokompozitlerin, farmasötik atıkların sudan

uzaklaştırılmasında hem yüksek verimli hem de operasyonel açıdan sürdürülebilir bir seçenek olduğunu ortaya koymuştur (Moradi, 2015).

Grafen türevlerinin manyetik modifikasyonla fonksiyonelleştirilmesini konu alan bir araştırmada, manyetik grafen nanolevhaların (M-GNP) Amoksisilin antibiyotiği üzerindeki adsorpsiyon kinetiği ve termodinamiği incelenmiştir. Kerkez-Kuyumcu ve ekibi tarafından gerçekleştirilen çalışmada, pH 5,0 gibi hafif asidik bir ortamda ve 293 K sıcaklıkta gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları neticesinde, M-GNP'lerin saf grafen ve manyetit bileşenlerine kıyasla çok daha üstün bir tutunma kapasitesi sergilediği rapor edilmiştir. Langmuir izotermine göre 106,38 mg/g kapasite değerine ulaşılan süreçte, adsorpsiyon mekanizmasının temelinde π - π istifleme ve elektrostatik çekim kuvvetlerinin yer aldığı belirlenmiştir. Ekzotermik karakterdeki sürecin sonunda adsorbentin manyetik yolla kolayca geri kazanılarak tekrar kullanılabilirliğini koruması, M-GNP'lerin farmasötik kirleticilerin sudan uzaklaştırılmasında yüksek kararlılığa sahip, teknolojik bir alternatif olduğunu kanıtlamaktadır (Kerkez-Kuyumcu vd., 2016).

Tarımsal atıkların ileri teknoloji adsorbentlere dönüştürülmesini konu alan bir araştırmada, guava çekirdeklerinden NaOH aktivasyonu ile üretilen aktif karbonun Amoksisilin giderimindeki olağanüstü performansı rapor edilmiştir. Pezoti ve ekibi tarafından yürütülen çalışmada, sentezlenen karbonun 2573,6 m²/g gibi ekstrem bir yüzey alanına sahip olduğu ve bu yapısal özelliğin Amoksisilin için 570,48 mg/g gibi literatürdeki pek çok adsorbentten daha yüksek bir kapasite sunduğu vurgulanmıştır. pH 4,0 ortamında optimize edilen süreçte, adsorpsiyon mekanizmasının temel olarak kimyasal adsorpsiyon (chemisorption) karakterinde olduğu; Elovich kinetik ve Redlich–Peterson izoterm modelleriyle doğrulanmıştır. Termodinamik analizler, sürecin endotermik doğasını ve kendiliğinden gerçekleşme eğilimini ortaya koyarken; guava çekirdeği bazlı bu karbonun organik kirleticilerin arıtılmasında yüksek verimli ve potansiyel bir materyal olduğunu kanıtlamıştır (Pezoti vd., 2016).

Tarımsal yan ürünlerin aktif karbon üretiminde kullanımını ele alan bir araştırmada, hurma çekirdeklerinden CO₂ aktivasyonu ile sentezlenen materyallerin Amoksisilin adsorpsiyonundaki etkinliği ticari aktif karbonlarla kıyaslanmıştır. Belhachemi ve Djelaila tarafından yürütülen çalışmada, asidik pH koşullarında (pH < 6) adsorpsiyon veriminin arttığı ve bu süreçte fiziksel adsorpsiyon mekanizmalarının belirleyici rol oynadığı saptanmıştır. Deneysel verilerin Langmuir ve Sips izoterm modelleriyle yüksek uyum sergilediği süreçte, yerel kaynaklardan üretilen karbonun 424 mg/g gibi yüksek bir kapasiteye ulaşarak piyasadaki ticari alternatiflerinden daha üstün bir performans sergilediği rapor edilmiştir. Bu bulgular, hurma çekirdeği atıklarının hem ekonomik hem de yüksek yüzey alanına sahip profesyonel bir adsorbent hammaddesi olarak

Amoksisilin kirliliğiyle mücadelede kullanılabileceğini kanıtlamaktadır (Belhachemi ve Djelaila, 2017).

Geçmiş çalışmaların bulguları, tarih sırasına göre düzenlenerek Çizelge 2.4. Literatürdeki farklı adsorbentlerin Amoksisilin giderim performanslarının karşılaştırılması sunulmuştur.

Çizelge 2.4. Literatürdeki farklı adsorbentlerin Amoksisilin giderim performanslarının karşılaştırılması

Adsorbent	pH	Temas Süresi (dk)	%Giderim / q_{max}	İzoterm Modeli	Kinetik Modeli	Referans
Kitosan boncukları	6,5	-	8,71 mg/g	Langmuir	Sonlu Banyo Modeli	Adriano vd., 2005
Amonyum klorür ile aktive edilmiş nar odunu bazlı aktif karbon (NAC)	6	360	437 mg/g	Langmuir	Yalancı 2. dereceden	Moussavi vd., 2013
Hekzadesil trimetil amonyum modifiyeli bentonit (Organo-bentonit)	7	60	26,18 mg/g / %87,5 giderim	Langmuir	Yalancı 2. Dereceden	Zha vd., 2013
Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (MWCNT)	4,6	40	22,9 mg/g / %87,9 giderim	Langmuir	-	Mohammadi vd., 2015
Asma Odunu Bazlı Aktif Karbon Nanopartikül (NaOH)	2	480	2,69 mg/g	Langmuir	Yalancı 2. Derece	Pouretedal ve Sadegh, 2014

Sodyum Dodesil Sulfat (SDS) - Anyonik Sürfaktan	4	40	%87,7 giderim	Freundlich	Yalancı 1. Dereceden	Boukhelkhal vd., 2015
<i>Arundo Donax</i> Bazlı Mikrodalga Aktif Karbon (KOH, 620W)	6,7	1440 dk	345,4 mg/g	Sips	Yalancı 2. Dereceden	Chayid ve Ahmed, 2015
Manyetik Grafen Oksit Nanokompoziti (MGO / Fe ₃ O ₄ @GO)	6	180	372,4 mg/g	Langmuir	Yalancı 2. Dereceden	Moradi, 2015
Tartarik Asit Modifiye Buğday Tanesi (%20)	7	5	31,25 mg/g / %84 giderim	Temkin	Yalancı 2. Dereceden	Boukhelkhal vd., 2016
Manyetik olarak modifiye edilmiş grafen nanolevhalar (M-GNP)	5	90	106,38 mg/g	Langmuir/ Temkin	Yalancı 2. Dereceden	Kerkez-Kuyumcu vd., 2016
Guava Çekirdeği Bazlı Aktif Karbon	4	60	570,48 mg/g	Redlich-Peterson	Elovich	Pezoti vd., 2016
Hurma Çekirdeği Bazlı Aktif Karbon (CO ₂ Aktivasyon, AC2)	<6	400	424,3 mg/g	Langmuir / Sips	Yalancı 2. Dereceden	Belhachemi ve Djelaila, 2017
<i>Azolla Filiculoides</i> Bazlı Aktif Karbon (ZnCl ₂ , 600°C)	7	75	265,2 mg/g / %90 giderim	Langmuir	Yalancı 2. Dereceden	Balarak vd., 2017

Granüler Aktif Karbon (Ticari, GAC)	5.5	240	4,4 mg/g	Sips	Yalancı 2. Dereceden	Espina de Franco vd., 2017
ZnO Kaplı Karbon Nanofiber Kompozit (ZnO@CNF)	7	60	156 mg/g	Langmuir	Yalancı 2. Dereceden	Chaba ve Nomngongo, 2019
Manyetik Kompozit Adsorbent (Fe ₃ O ₄ /Zeytin Çekirdeği, Sonokimyasal)	6	90	238,1 mg/g	Langmuir	Yalancı 2. Dereceden	Jafari vd., 2019
Brezilya Fındığı Kapsülü Bazlı Aktif Karbon (600-700°C)	7	30	454,7 mg/g (45°C)	Liu	Avrami Kesirli Derece	Lima vd., 2019
<i>Saccharomyces Cerevisiae</i> Biyo-Adsorbent	5	120	%93	Freundlich	Yalancı 2. Dereceden	Samarghandi vd., 2019
Kaolinit kili	5,33	20	26 mg/g	Freundlich	Yalancı 1. Dereceden	El Azzouzi vd., 2022
ZnO Nanopartikül Kaplı Antep Fıstığı Kabuğu Kompozit (CPS)	5	90	163 mg/g %92,9 giderim	Langmuir	Yalancı 2. Dereceden	Mohammed vd., 2022
Kahve atığı bazlı aktif karbon	>10	2880	370 mg/g	Langmuir / Sips	-	Laksaci vd., 2023
Karboksimetil kitre zamkılı-polianilin/manyetik	7	20	909,09 mg/g	Freundlich	Yalancı ikinci dereceden	Mosavi vd., 2023

demir oksit bionanokompoziti (CMT-g- PANI@Fe ₂ O ₃)						
Pirinç Kabuğu Bazlı Silika Nanopartikül (Sol- Gel)	7	200	99,8 mg/g	Langmuir / Temkin	Yalancı 2. Dereceden	Elnazer vd., 2024
Aminoetilaminoetil -fenetil- trimetoksisilan Fonksiyonlu Oyuk Silika Küre (AP- NHSS)	5	60	384,6 mg/g	Langmuir	Yalancı 1. Dereceden	Alshehri vd., 2025

3. ADSORPSİYON

Adsorpsiyonun tarihsel gelişimi, 18. yüzyılın son çeyreğinde Scheele ve Fontana'nın (1773-1777) gazların kömür ve killer tarafından tutulmasını rapor etmesine kadar uzanmaktadır. Sürecin endüstriyel boyuttaki ilk uygulamaları 1780'li ve 1790'lı yıllarda Lowitz ve Kehl gibi araştırmacıların kömürü; asit çözeltilerinin renk giderimi, koku giderme ve şeker rafinasyonu gibi alanlarda kullanmasıyla başlamıştır. 19. yüzyılın başında De Saussure'ün (1814) farklı gözenekli maddeler üzerinde yürüttüğü sistematik çalışmalar, adsorpsiyonun ekzotermik (ısı veren) doğasını bilimsel olarak kanıtlamıştır. Bilimsel terminolojideki asıl kırılma ise 1881 yılında Kayser'in 'adsorpsiyon' terimini literatüre kazandırması ve 'izoterm' kavramının kullanımına öncülük etmesiyle yaşanmıştır. 20. yüzyılın başlarında von Ostreyko'nun aktif karbonun ticari gelişimine temel oluşturan aktivasyon yöntemlerini ortaya koyması ve Tswett'in (1903) seçici adsorpsiyon üzerinden kromatografiyi keşfetmesi, bu alanı analitik bir disipline dönüştürmüştür (Dabrowski, 2001).

Güncel tanımıyla adsorpsiyon, sıvı veya gaz fazındaki bileşenlerin (adsorbat), katı bir yüzey (adsorbent) üzerinde fiziksel veya kimyasal kuvvetlerle tutunarak yüzeyde birikmesi olayıdır (Thomas ve Crittenden, 1998). Bu süreçte yüzeyde tutunan maddeye adsorbat, tutunmanın gerçekleştiği katı faza ise adsorbent denir; bu etkileşimin tersine çevrilerek tutunan maddenin yüzeyden ayrılması işlemi ise desorpsiyon olarak tanımlanır (Ruthven, 1984). Bu üç kavram dinamik bir döngü içerisindedir: Adsorbentin gözenek yapısı ve spesifik yüzey alanı adsorbatın tutunma miktarını belirlerken, desorpsiyon adımı hem adsorbentin yeniden kullanımı (rejenerasyon) hem de Amoksisilin gibi değerli farmasötik maddelerin geri kazanılması açısından kritik öneme sahiptir (Worch, 2012).

Deneyisel çalışmalar neticesinde toplanan veriler, adsorpsiyon mekanizmasının temel dinamiklerini ve sistemin genel verimliliğini aydınlatmak amacıyla bir dizi matematiksel modelleme ve termodinamik formülasyon aracılığıyla işlenir (Kolasinski, 2012). Bu analizler kapsamında, öncelikle birim adsorbent kütlesi tarafından hapsedilen adsorbat miktarını temsil eden adsorpsiyon kapasitesi (q_e) hesaplanarak, kullanılan materyalin (Amberlyst 15 veya aktif karbon gibi) hedef bileşeni ayırmadaki başarısı sayısal olarak ortaya konur (Worch, 2012). Sürecin denge halindeki davranışını açıklayan Langmuir ve Freundlich gibi izoterm modelleri, yüzey etkileşimlerinin tek tabakalı veya çok tabakalı doğası ile adsorbent yüzeyinin homojenliği hakkında kritik bilgiler sunar (Dabrowski, 2001). Sistemin zamana bağlı değişimini inceleyen kinetik modeller ise adsorpsiyon hızını ve süreci sınırlayan difüzyon basamaklarını tanımlarken; farklı sıcaklıklarda elde edilen veriler üzerinden hesaplanan Gibbs serbest enerjisi (ΔG^0), entalpi

(ΔH^0) ve entropi (ΔS^0) gibi termodinamik parametreler, etkileşimin kendiliğindenliği ve enerji karakteristiği hakkında kapsamlı bir değerlendirme yapılmasına olanak tanır (Ruthven, 1984; Ho & Mckay, 1999).

3.1. Adsorpsiyon Türleri

Adsorpsiyon mekanizmaları, adsorbat molekülleri ile adsorbent yüzeyi arasındaki etkileşimin doğasına göre temel olarak fiziksel adsorpsiyon (fizisorpsiyon) ve kimyasal adsorpsiyon (kemisorpsiyon) olmak üzere iki ana kategoride incelenir. Bu iki tür arasındaki temel farklar, bağlanma enerjileri, seçicilik ve geri dönüşümlülük gibi parametreler üzerinden tanımlanmaktadır.

3.1.1. Fiziksel adsorpsiyon (Fizisorpsiyon)

Fiziksel adsorpsiyon, moleküller arası zayıf Van der Waals kuvvetleri ve elektrostatik etkileşimler aracılığıyla gerçekleşen bir süreçtir. Bu türde, adsorbat molekülleri adsorbent yüzeyinde kimyasal yapısını değiştirmeden tutunur; bu durum sürecin düşük aktivasyon enerjisiyle ve genellikle hızlı bir şekilde gerçekleşmesini sağlar. Fiziksel adsorpsiyonun en belirgin özelliklerinden biri "geri dönüşümlü" (reversible) olmasıdır; yani sıcaklık artışı veya basınç düşüşü ile adsorbat yüzeyden kolayca ayrılabilir (desorpsiyon). Ayrıca, fizi-sorpsiyon belirli bir bölgeye özgü değildir ve uygun koşullar altında yüzeyde çok tabakalı (multilayer) birikime izin verir (Dabrowski, 2001; Worch, 2012).

3.1.2. Kimyasal adsorpsiyon (Kemisorpsiyon)

Kimyasal adsorpsiyon, adsorbat ile adsorbent yüzeyindeki aktif bölgeler arasında güçlü kimyasal bağların (genellikle kovalent veya iyonik bağlar) oluşmasıyla karakterize edilir (Thomas ve Crittenden, 1998). Bu etkileşim, fiziksel adsorpsiyona kıyasla çok daha yüksek bir bağ enerjisi (entalpi değişimi) gerektirir ve genellikle yüksek aktivasyon enerjisi nedeniyle sıcaklık artışıyla hızlanır. Kemi-sorpsiyon süreci oldukça seçicidir; yalnızca belirli fonksiyonel gruplar ile yüzeydeki aktif bölgeler arasında gerçekleşir. Bağların gücü nedeniyle süreç çoğu zaman "geri dönüşümsüzdür" (irreversible) ve yüzeydeki aktif bölgeler doyduğunda adsorpsiyon durduğu için sadece tek tabakalı (monolayer) bir tutunma gözlenir (Atkins ve de Paula, 2006; Webb, 2003).

Çizelge 3.1. Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyonun temel farklılıkları

Adsorpsiyon Türleri	Fiziksel Adsorpsiyon (Fizisorpsiyon)	Kimyasal Adsorpsiyon (Kemisorpsiyon)
Etkileşim Türü	Van der Waals kuvvetleri (elektrostatik etkileşimler)	Kimyasal bağlar (kovalent veya iyonik)
Isı Değişimi	Düşüktür (~5-40 kJ/mol)	Yüksektir (~40-800 kJ/mol)
Oluşum	Hızlıdır, geri dönüşümlüdür	Daha yavaştır, genellikle geri dönüşsüzdür
Tabaka Oluşumu	Tek veya çok tabakalı olabilir	Genellikle tek tabakalıdır
Sıcaklıktan Etkilenme	Düşük sıcaklıkta tercih edilir	Yüksek sıcaklıkta tercih edilir
Seçicilik	Düşüktür	Yüksektir
Desorpsiyon	Kolaydır	Zordur, yüksek enerji gerekir
Örnek Alanlar	Gazların aktif kömüre tutunması, nem adsorpsiyonu, soğutucu uygulamalar	Katalizör yüzey reaksiyonları, gaz sensörleri, kimyasal dönüşümler

3.2. Adsorpsiyona Etki Eden Faktörler

Amoksisilin gibi farmasötik bileşiklerin sulu çözeltilerden geri kazanılması sürecinde, adsorpsiyon verimliliği sistemin fiziksel ve kimyasal parametrelerine doğrudan bağlıdır. Sürecin verimliliğini doğrudan etkileyen bu parametreler, temel özelliklerine göre sınıflandırılarak Şekil 3.1'de şematize edilmiştir.

Fizikokimyasal Faktörler	Operasyonel Faktörler	Çevresel ve Termodinamik Faktörler
• Adsorbent türü ve yüzey yapısı • Adsorbatın türü • Yüzey Alanı ve Gözeneklilik	• Başlangıç Adsorbat Derişimi • Adsorbent Miktarı (dozaj) • Karıştırma Hızı • Temas Süresi	• Çözeltilerin pH değeri • Sıcaklık • Yüzey Gerilimi ve Basınç

Şekil 3.1. Adsorpsiyona etki eden faktörler

3.2.1. Adsorbentin türü ve özellikleri

Adsorpsiyon yöntemi uzun süredir kullanılan etkili bir arıtma tekniğidir ve geniş kullanım alanına sahip olmasına rağmen kullanılan adsorbent materyallerin ekonomik açıdan dezavantajlı olması yeni ve düşük maliyetli adsorbent araştırmalarına olan ilgiyi artırmıştır.

Adsorbentin yapısal ve kimyasal kimliği, bir adsorpsiyon işleminin hem kapasitesini hem de seçiciliğini belirleyen en temel unsurdur. Genel olarak adsorbentler, kökenlerine ve bileşimlerine göre üç ana grupta sınıflandırılmaktadır: Karbon bazlı adsorbentler arasında aktif karbon ve karbon nanomalzemeler; mineral adsorbentler arasında silika jel, aktif alümina ve zeolitler; diğer adsorbentler arasında ise sentetik polimerler ve kompozit adsorbentler yer almaktadır (Dabrowski, 2001). Bir adsorbent türünün pratik uygulamalarda etkin olarak kullanılabilmesi için yüksek yüzey alanı ve adsorpsiyon kapasitesinin yanı sıra uygun gözenek boyutu ve gözenek hacmine sahip olması önemli özellikler arasında yer almaktadır (Kyzas & Matis, 2015). Ancak, tek başına geniş bir yüzey alanı yeterli değildir; hedef adsorbat moleküllerinin gözeneklere rahatça nüfuz edebilmesi, sterik engellerle karşılaşmaması ve tanecik içi difüzyonun kesintisiz gerçekleşebilmesi için gözenek boyutu dağılımının adsorbatın moleküler boyutlarıyla uyumlu olması şarttır (Rouquerol vd., 1999). Bunların yanı sıra, yüzeydeki fonksiyonel gruplar ve yüzey yükü tarafından şekillendirilen yüzey kimyası, kirletici ile meydana gelecek elektrostatik veya kimyasal etkileşimlerin türünü belirlemede belirleyici bir rol oynar. Bu morfolojik ve kimyasal özelliklerin ötesinde, adsorbentin pratik uygulamalarda kullanılabilmesi açısından yeterli mekanik dayanıklılığa sahip olması ve rejenerasyon sonrasında birden fazla adsorpsiyon döngüsünde yeniden kullanılabilmesi de önem taşımaktadır (Dabrowski, 2001).

Endüstriyel atıksu arıtımı ve gaz saflaştırma proseslerinde, hedef kirleticilerin uzaklaştırılması amacıyla laboratuvar ve sanayi ölçeğinde çok çeşitli gözenekli katı malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler arasında en köklü ve yaygın uygulama alanına sahip olanı, odun,

kömür veya hindistan cevizi kabuğu gibi öncüllerden üretilen, 500 ile 2000 m²/g arasında değişen muazzam bir özgül yüzey alanına sahip aktif karbondur (Yu & Han, 2015). Aktif karbon, sahip olduğu gelişmiş gözenekli yapısı ve yüksek yüzey alanı sayesinde organik kirletici türlerini; yüzeyindeki fonksiyonel gruplar aracılığıyla da ağır metal iyonlarını etkili biçimde adsorplayabilmektedir (Gabaldón vd., 2006). Diğer taraftan zeolitler ve mezogözenekli silika malzemeler, ilaç kalıntıları ve antibiyotikler gibi mikro kirleticilerin sudan temizlenmesinde hidrofilik/hidrofobik dengeleri ve düzenli kristal gözenek ağları sayesinde etkili alternatifler sunmaktadır (Grela vd., 2021). Benzer şekilde, sol-jel prosesleriyle sentezlenen silika jel ve alüminyum oksitin ısıtılmasıyla elde edilen aktif alümina, geniş iç yüzey alanları ve ayarlanabilir gözenek boyutları nedeniyle özellikle nem alma, gaz kurutma ve polar uçucu organik bileşiklerin (VOC) tutulmasında endüstriyel standartlar haline gelmiştir (Wang vd., 2004). Son yıllarda ise, geleneksel adsorbentlerin yüksek maliyetlerini ve rejenerasyon zorluklarını aşmak adına, kitinden türetilen kitosan gibi biyopolimerler ile tarımsal ve endüstriyel atıklardan elde edilen düşük maliyetli "yeşil" adsorbentlerin atıksu arıtımındaki potansiyeline yönelik akademik ilgi gözle görülür bir şekilde artmıştır (Ho, 2022; Yu & Han, 2015).

Geleneksel karbon bazlı adsorbentlerin yanı sıra, özellikle endüstriyel atıksulardan spesifik organik moleküllerin ve farmasötik bileşiklerin geri kazanılmasında "Amberlyst" serisi gibi makro-gözenekli iyon değiştirici reçineler kritik bir role sahiptir (Silah & Gül, 2018). Amberlyst 15 (asidik/katyonik) ve Amberlyst A21 (bazik/anyonik) gibi polistiren-divinilbenzen matrisli reçineler, yüksek gözenek hacimleri ve fiziksel dayanıklılıkları sayesinde karmaşık sulu çözeltilerde üstün performans sergilemektedir (Pal vd., 2012; Víctor-Ortega vd., 2016). Amberlyst tipi polimerik adsorbentler, yüksek yüzey alanları ve mekanik dayanıklılıklarının yanı sıra fonksiyonel yapılarıyla öne çıkmaktadır. Klasik aktif karbonun genel fiziksel tutunum mekanizmasının aksine, Amberlyst reçineleri bünyelerinde barındırdıkları fonksiyonel gruplar (örneğin -SO₃H veya amin grupları) sayesinde, hedef kirleticinin fonksiyonel gruplarıyla spesifik elektrostatik etkileşimlere, iyon değişim reaksiyonlarına veya hidrojen bağlarına girerek üstün bir seçicilik sağlar (Başar & Silah, 2020; Wolska vd., 2024). Literatürde sıkça kullanılan farklı adsorbent türlerinin birbirlerine karşı sağladığı avantajlar ve sınırlılıkları Çizelge 3.2'de karşılaştırmalı olarak özetlenmiştir.

Çizelge 3.2. Farklı adsorbent türlerinin avantaj ve dezavantajları

Adsorbent Türü	Belirgin Avantajları	Temel Dezavantajları / Sınırlılıkları
Polimerik Reçineler (Amberlyst vb.)	Fonksiyonel gruplarla yüksek seçicilik; düzgün gözenek boyutu dağılımları; mükemmel mekanik kararlılık; asidik/bazik ortamlarda kolay rejenerasyon. İlaç molekülünün yapısına göre (nötr, iyonik, katyonik veya zwitteriyonik) kimyasal olarak tasarlanabilirler. Aromatik polimerik matrisler, aromatik halka içeren ilaçlarla (Amoksisilin vb.) π - π etkileşimi kurarak mükemmel uyum sağlar. Belirli fonksiyonel grupları sayesinde (örn: Amberlyst'in asidik/bazik grupları) hedef ilaca karşı güçlü ve seçici bir afinite (K_L) geliştirirler.	Yüksek ilk yatırım maliyeti; bazı organik çözücülere karşı şişme (swelling) eğilimi; inorganik tuz ve iyon konsantrasyonu hassasiyeti; aktif karbon veya mezogözenekli malzemeler ile kıyaslandığında genel olarak özgül yüzey alanları daha düşüktür.
Aktif Karbon	Çok geniş spesifik yüzey alanı; yüksek gözeneklilik; esnek yüzey fonksiyonelliği; işletmedeki çok yönlülük; tekrar kullanılabilirlik; ekonomiklik.	Performans standardının olmaması / kararsızlık; çözelti ortamına ve adsorbat özelliklerine bağımlılık; aşırı reaksiyonun gözenek duvarlarını yıkma riski.
Zeolitler	Düşük maliyet ve bol bulunabilirlik; seçici adsorpsiyon; düşük çevresel etki ve sürdürülebilirlik; yüksek verimlilik; geniş	Bileşim ve saflık tutarsızlığı; öngörülemez sonuçlar; doğrudan kullanım yetersizliği / ek işlemlere ihtiyaç duyulması; ham haldeki safsızlık sınırlaması; sentetik zeolitlere daha fazla bağımlılık.

	fonksiyonellik; geliştirilebilir (modifiye edilebilir) olması; yapısal sağlamlık ve alan genişliği; yüksek iyon değişimi.	
Tarımsal Biyokütleler (Yeşil Adsorbentler)	Düşük maliyet ve yerel bulunabilirlik; çevre dostu ve sürdürülebilir yapı; minimum ön işlem gereksinimi (kolay hazırlanma); zengin organik içerik; çeşitli fonksiyonel gruplar; yüksek spesifik kapasite.	Düşük adsorpsiyon kapasitesi; düşük seçicilik (selektif olmama); türler arasındaki büyük verim farkı; düşük yenilenme (rejenerasyon) kapasitesi; çürüme ve bozulma riski (biyolojik hassasiyet).
Biyokömür (Biochar)	Yüksek sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi; karbon tutma ve iklim değişikliği ile mücadele; düşük üretim maliyeti; gelişmekte olan ülkeler için erişilebilirlik; ekonomik rejenerasyon potansiyeli; zengin fonksiyonel gruplar; yüksek gözenekliliği ve yüzey kimyası sayesinde geniş kirletici yelpazesi.	Standartlaştırma zorluğu (değişkenlik); çevresel koşullara aşırı bağımlılık; orta düzey adsorpsiyon kapasitesi ve yavaş adsorpsiyon kinetiği; düşük seçicilik (selektif olmama); yapısal hasar ve rejenerasyon maliyeti; ikincil kirlilik (kimyasal sızıntı) riski; üretim ölçeklenebilirliği.
Nanomalzemeler	Olağanüstü yapısal ve optik özellikler; çok yüksek reaktivite ve seçici adsorpsiyon; çok işlevlilik (multifonksiyonellik); ileri oksidasyon ve fotokataliz gücü; antimikrobiyal (dezenfeksiyon) yeteneği;	Yüksek üretim maliyeti; sudan geri kazanım / ayırma zorluğu; sağlık ve çevre riski (toksikite belirsizliği); ölçeklenebilirlik sorunu.

	çok yönlü teknolojik çözümler.	
Kitosan (Chitosan) (Doğal Biyopolimer)	Toksik olmaması; biyobozunurluk; biyoyumluluk; bol ve yenilenebilir kaynak; zengin azot ve fonksiyonel gruplar; yüksek reaktivite; kimyasal kararlılık; yüksek seçicilik; ekonomiklik.	Gözeneksiz yapı; çok düşük yüzey alanı; doğrudan kullanım yetersizliği (fiziksel ve kimyasal modifikasyonlara ihtiyaç duyması).
Uçucu Kül (Fly Ash) (Endüstriyel Atık)	Atık değerlendirme ve çevre koruma; aktif karbona kıyasla çok daha ucuz ve kolay bulunabilir olması; çok yüksek karbon içeriği, gözenekli yapı, büyük gözenek hacmi ve mükemmel adsorpsiyon kapasitesi (hidrofilik yüzey); asit (HCl) modifikasyonu ile yüzey alanının ~9 katına çıkabilmesi; modifikasyona yüksek yatkınlık; parçacıkların büyük oranda küresel camsı şekle ve amorf yapıya sahip olması.	İyi işlenmediğinde su, hava ve toprağı kirletme riski; saklanması getirdiği lojistik ve çevresel problem; parametrelere aşırı bağımlılık ve değişkenlik; ham uçucu külün düşük bir yüzey alanına sahip olması; parçacık boyutunun çok geniş / düzensiz bir dağılım göstermesi.

(Ho, 2022; Klepáčová vd., 2006; Mahdavi vd., 2025)

3.2.2. Adsorbatın (Adsorplanan madde) türü

Çözeltiden adsorpsiyon, adsorbat ile çözücü moleküllerinin katı yüzeyine tutunmak için rekabet ettiği dinamik bir süreçtir. Bu dengede adsorbatın sahip olduğu fonksiyonel grupların türü, sayısı ve yapısal geometrisi, molekülün adsorbent yüzeyine olan afinitesini doğrudan belirler. Özellikle asidik veya bazik karakterdeki fonksiyonel gruplar çözelti pH'ına bağlı olarak iyonlaşabildiğinden, adsorbat ile adsorbent yüzeyi arasında elektrostatik çekme veya itme kuvvetlerinin doğmasına yol açar. Ayrıca adsorbat molekülünün çözünürlüğü ve çözücüyle olan etkileşimleri adsorpsiyon dengesini önemli seviyede etkilerken, adsorbent yüzeyinin enerjetik heterojenliği de adsorpsiyon davranışının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Sonuç olarak, adsorbatın kimyasal kimliği ve çözelti içi davranışları, sistemin adsorpsiyon kapasitesini ve mekanizmasını belirleyen en temel parametrelerdendir (Deryło-Marczewska ve Marczewski, 2002).

3.2.3. Çözelti pH'ı

Çözelti pH'ı, hem adsorbentin yüzey yükünü hem de ilaç moleküllerinin iyonlaşma durumunu belirleyen en kritik parametredir. Adsorbent yüzeyi, sıfır yük noktasının (pH_{pzc}) altındaki pH değerlerinde pozitif, üzerindeki değerlerde ise negatif yük kazanır (Noh ve Schwarz, 1989). Benzer şekilde, farmasötik bileşiklerin iyonik yükü de kendi pK_a değerlerine ve ortam pH'ına bağlı olarak değişir. pH'a bağlı olarak gelişen bu yük değişimleri, adsorbat ile adsorbent arasında özellikle zwitter iyonik maddelerde pH değişimi elektrostatik çekme veya itme kuvvetleri oluşturarak süreci doğrudan yönlendirir. Ayrıca pH, ilaç moleküllerinin sudaki çözünürlüğünü ve hidrojen bağı kurma kapasitesini de etkilediğinden, maksimum adsorpsiyon verimi için sistemin elektrostatik dengesini sağlayan optimum bir pH değerinin belirlenmesi şarttır (Mahdavi vd., 2025).

3.2.4. Başlangıç adsorbat derişimi

Başlangıç adsorbat derişimi, adsorpsiyon sürecinin verimliliğini ve kapasitesini belirleyen en temel parametrelerden biridir. Çözeltideki başlangıç ilaç (adsorbat) konsantrasyonunun artırılması, sıvı faz ile katı faz (adsorbent) arasında güçlü bir kütle transferi itici gücü (driving force) oluşturur. Bu durum, sıvı ve katı faz arasındaki kütle transferini destekleyerek adsorpsiyon kapasitesinin artmasına katkı sağlar (Lin vd., 2009). Buna bağlı olarak, adsorbatın başlangıç derişimi arttıkça adsorbentin birim kütle başına dengede adsorpladığı adsorbat miktarı (q_e , mg/g) artış göstermektedir. Çünkü yüksek konsantrasyonlarda, adsorbent yüzeyindeki aktif bölgeler ile adsorbat molekülleri arasındaki çarpışma olasılığı maksimuma ulaşır. Ancak, adsorpsiyon (giderim) yüzdesi (%) genellikle yüksek başlangıç derişimlerinde azalma eğilimindedir; bunun

sebebi, adsorbent üzerindeki sınırlı sayıdaki aktif bölgenin yüksek dozdaki adsorbat molekülleri tarafından hızla doygunluğa ulaştırılmasıdır (Zadvarzi ve Amooey, 2023).

3.2.5. Sıcaklık

Sıcaklık, adsorpsiyon sürecinin termodinamik yapısını, dengesini ve mekanizmasını doğrudan etkileyen kritik bir değişkendir. Sıcaklıkta meydana gelen değişimler, hem ilaç moleküllerinin çözelti içindeki difüzyon hızını hem de adsorbent yüzeyinin aktif bölgelerinin enerjisel durumunu değiştirir (Al-Ghouti ve Da'ana, 2020). Sıcaklık artışıyla birlikte dengedeki adsorpsiyon kapasitesinin (q_e) nasıl değiştiği, sürecin ekzotermik veya endotermik olmasına bağlıdır. Eğer ilaç moleküllerinin adsorbent yüzeyine tutunması ekzotermik (ısı veren) bir etkileşim ise, sıcaklık arttıkça moleküllerin yüzeyden ayrılma eğilimi (desorpsiyon) artar ve toplam adsorpsiyon kapasitesi azalır (Anastopoulos vd., 2020). Aksine, sürecin endotermik (ısı alan) olması durumunda, sıcaklık artışı ilaç moleküllerinin hareketliliğini (mobilité) artırarak gözenek içi difüzyonu kolaylaştırır ve kapasitenin yükselmesini sağlar. Ayrıca yüksek sıcaklıklar, adsorbent üzerindeki bazı pasif bölgeleri aktive ederek yeni bağlanma alanları yaratabilir (Doğan vd., 2004).

3.2.6. Temas (Dengeye gelme) süresi

Temas süresi, adsorpsiyon sürecinin kinetiğini ve sistemin dengeye ulaşması için gereken optimum süreyi belirleyen kritik bir parametredir. İşlemin ilk aşamalarında, adsorbent yüzeyinde çok sayıda boş aktif bölgenin bulunması ve kütle transferi itici gücünün yüksek olması nedeniyle ilaç adsorpsiyon hızı oldukça yüksektir. Süre ilerledikçe aktif bölgeler hızla dolar ve ilaç moleküllerinin gözenek içi difüzyonu yavaşlar. Belirli bir süre sonunda, adsorpsiyon ve desorpsiyon hızlarının eşitlenmesiyle sistem "adsorpsiyon dengesine" ulaşır. Bu denge süresine ulaşıldıktan sonra temas süresinin uzatılması, adsorplanan ilaç miktarında (q_e) kayda değer bir artış sağlamaz (Perumal vd., 2024).

3.2.7. Adsorbent miktarı (Dozaj)

Adsorbent dozu, sürecin ekonomikliği ve verimliliği açısından optimize edilmesi gereken bir parametredir. Çözeltideki adsorbent miktarı artırıldığında, toplam yüzey alanı ve kullanılabilir aktif bölge sayısı arttığı için ilacın yüzde uzaklaştırma verimi yükselir (Garg vd., 2003). Buna karşın, adsorbent miktarı arttıkça gram başına düşen adsorbat miktarı (q_e) genellikle azalır. Çünkü adsorbat miktarı sabitken ortamdaki tutunma yerleri (aktif bölgeler) boş kalır. Ayrıca, çok fazla adsorbent eklendiğinde tanecikler birbirine yapışıp topaklanarak adsorbatın yanaşabileceği yüzey alanını küçültür (Zadvarzi ve Amooey, 2023).

3.2.8. Karıştırma hızı

Adsorpsiyon sürecinin gerçekleştiği sistemde karıştırma işleminin uygulanması, dış kütle transfer katsayısını artırarak adsorbat moleküllerinin adsorbent yüzeyine taşınımını hızlandırmaktadır. Böylece dış film tabakasındaki kütle transfer direnci azaltılarak adsorpsiyonun daha hızlı gerçekleşmesi sağlanmaktadır (Purkait vd., 2007).

3.2.9. Yüzey yapısı, genişliği ve gözeneklilik

Adsorbentin yüzey alanı, gözenek hacmi ve gözenek boyutu dağılımı, adsorpsiyon kapasitesini doğrudan belirleyen en kritik fiziksel özelliklerdir. Bir adsorbentin spesifik yüzey alanı (m²/g) ne kadar geniş ve gözenekliliği ne kadar yüksekse, ilaç/adsorbat moleküllerinin tutunabileceği aktif bölge sayısı da o oranda artar (Rouquerol vd., 1999).

3.3. Adsorpsiyon Termodinamiği

Adsorpsiyon sürecinin termodinamik açıdan araştırılması, sürecin enerjetik özelliklerinin ve kendiliğinden gerçekleşme eğiliminin değerlendirilmesine imkan sağlamaktadır. Bu amaçla standart entalpi (ΔH°), standart Gibbs serbest enerjisi (ΔG°), ve standart entropi (ΔS°) değişimleri temel termodinamik parametreler olarak kullanılmaktadır. ΔG° değerinin negatif olması adsorpsiyon sürecinin termodinamik olarak elverişli ve kendiliğinden gerçekleştiğini, ΔH° değeri sürecin endotermik veya ekzotermik karakterini, ΔS° ise adsorpsiyon sırasında sistemdeki düzensizlik değişimini ortaya koymaktadır (Anirudhan ve Radhakrishnan, 2008). Standart Gibbs serbest enerjisindeki değişim, Formül F.1 ve F.2’de yer alan bağıntı kullanılarak hesaplanabilir.

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (F.1)$$

Yukarıdaki eşitlikteki terimler;

ΔH° : Standart entalpi değişimi (kJ/mol)

ΔG° : Standart Gibbs serbest enerjisi değişimi (kJ/mol)

ΔS° : Standart entropi değişimi (kJ/mol K)

T: Mutlak sıcaklık (Kelvin) değerini göstermektedir.

Sistem parametrelerinin belirlenmesinde deneysel verilerden yararlanabilmek için reaksiyonun denge sabiti (K_c°) hesaplanır ve ardından Van 't Hoff yaklaşımından faydalanılır. Mutlak sıcaklığın tersi (1/T) ile denge sabitinin doğal logaritması ($\ln K_c^\circ$) arasındaki ilişkiyi kuran doğrusal denklem Formül F.3'te sunulmuştur (Tran vd., 2017).

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_c^\circ \quad (F.2)$$

$$\ln K_c^\circ = (\Delta S^\circ/R) - [(\Delta H^\circ/R) (1/T)] \quad (F.3)$$

Burada R, ideal gaz sabiti (8,314 J/molK) olarak işleme alınır. Çizilen Van 't Hoff grafiğinin eğiminden ve kesim noktasından ΔH° ve ΔS° değerlerine ulaşılır. Termodinamik açıdan ΔH° değerinin işareti, işletim sıcaklığının seçimi için belirleyicidir; negatif bir değer adsorpsiyonun ekzotermik doğasını, pozitif bir değer ise endotermik karakterini ortaya koyar. Ayrıca, hesaplanan ΔG° değerinin negatif çıkması, adsorpsiyon sürecinin termodinamik açıdan istemli (kendiliğinden gerçekleşebilir) bir yapıda olduğunu göstermektedir.

3.4. Adsorpsiyon Kinetiği

Bir adsorpsiyon sisteminin nasıl işlediğini tam manasıyla çözebilmenin yolu kinetik çalışmaların değerlendirilmesinden geçer. Bu veriler, özellikle büyük ölçekli tasarımlarda sürecin en yüksek verimle yürütülebilmesi için gerekli parametrelerin seçilmesini sağlar. Sürecin ilerleyişini tanımlamak amacıyla literatürde deneysel temelli çeşitli matematiksel modeller kullanılmaktadır. Bunlar arasında uygulaması en popüler olan yaklaşımlar ise yalancı birinci mertebe, yalancı ikinci mertebe ve tanecik içi difüzyon modelleri olarak sıralanabilir. (Largitte ve Pasquier, 2016).

3.4.1. Yalancı (Pseudo) birinci dereceden kinetik model

Katı yüzeyinde biriken madde miktarını temel alan bu yaklaşım, sıvı-katı sistemlerindeki sorpsiyon hızını açıklamak amacıyla literatüre kazandırılan ilk dinamik denklemdir. Bilim dünyasında sıklıkla "Lagergren bağıntısı" olarak da adlandırılan bu model, tarihsel açıdan kinetik çalışmaların temelini oluşturur (Lagergren, 1898; Wang ve Guo, 2020).

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (D.1)$$

Söz konusu diferansiyel hız denkleminin belirli sınırlar dahilinde entegrasyonu yapıldığında aşağıdaki doğrusal denklemle elde edilir:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 \cdot t \quad (D.2)$$

Bu matematiksel modelde yer alan k_1 , sisteme ait yalancı birinci derece hız sabitini (dk^{-1}) temsil etmektedir. Bununla birlikte, q_e ve q_t değerleri ise sırasıyla sistem dengede iken ve herhangi bir t süresi sonunda birim adsorbent kütlesi tarafından tutulan adsorbat miktarlarını (mg/g) göstermektedir (Ho, 2004).

3.4.2. Yalancı (Pseudo) ikinci dereceden kinetik model

Literatüre Ho ve McKay tarafından kazandırılan yalancı ikinci dereceden kinetik model, özellikle adsorbentinin katı fazdaki tutma kapasitesinin belirlenmesinde kullanılır. Bu model,

süreçteki bağ oluşumunun kimyasal etkileşimlere (kemisorpsiyon) dayandığını varsayan mekanizmaları tanımlamakta oldukça başarılıdır (Ho & Mckay, 1999).

Hız verilerinin matematiksel olarak değerlendirilmesinde kullanılan entegre doğrusal denklem aşağıda verilmiştir:

$$\frac{dq_t}{dt} = k(q_e - q_t)^2 \quad (D.3)$$

Bu bağıntıda yer alan k_2 , yalancı ikinci derece kinetik hız sabitini ($g \text{ mg}^{-1} \text{ dk}^{-1}$) ifade ederken; q_e ve q_t değerleri ise sırasıyla dengede ve herhangi bir t anında birim katı kütlesi tarafından bağlanan madde miktarlarını ($mg \text{ g}^{-1}$) temsil etmektedir (Bullen vd., 2021). İlgili modelin pratik uygulamasında, deneysel olarak elde edilen t değerlerine karşılık t/q_t oranları grafiğe dökülür. Oluşan doğrusal grafiğin eğiminden sistemin teorik denge kapasitesi (q_e) eksenini kestiği noktadan (orjinden kayma miktarı) ise k_2 hız sabiti hesaplanır.

3.4.3. Parçacık içi difüzyon modeli

Adsorpsiyon süreçlerinde kütle transfer adımlarını belirlerken, yalancı birinci veya ikinci mertebeden modeller kinetik mekanizmayı tam olarak aydınlatmada bazen yetersiz kalabilir. Bu tür durumlarda, kirletici moleküllerinin katı gözenekleri içerisindeki hareketini incelemek adına Weber ve Morris (1963) tarafından literatüre kazandırılan parçacık içi (gözenek içi) difüzyon modeline başvurulur. Sistemin difüzyon dinamiklerini matematiksel olarak ifade eden doğrusal denklem şu şekildedir:

$$q_t = k_i \cdot t^{1/2} + C \quad (D.4)$$

Bu bağıntıda yer alan parçacık içi difüzyon hız sabitini ($mg/g \text{ dk}^2$) gösterirken; t deneme süresini (dk) ve q_t ise o süre zarfında tutulan kirletici miktarını (mg/g) temsil eder. Formüldeki C sabiti ise doğrudan adsorbent yüzeyini saran sınır tabakasının kalınlığı hakkında bilgi verir. Bu değer büyümeye, yüzeydeki direncin ve sınır tabaka etkisinin o derece baskın olduğunu kanıtlar. Deneysel verilerin analizi için değerlerine karşı q_t grafiği oluşturulur. Elde edilen grafikteki doğrunun eğim katsayısı bize hız sabitini verirken, y-eksenini kestiği nokta (intersept) ise doğrudan C sabitini verir (Weber ve Morris, 1963).

Literatürde sıklıkla kullanılan bu kinetik modellerin teorik altyapıları, doğrusal eşitlikleri ve grafiksel parametre hesaplama yöntemleri toplu olarak Çizelge 3.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.3. Adsorpsiyon kinetik modellerinin karşılaştırılması

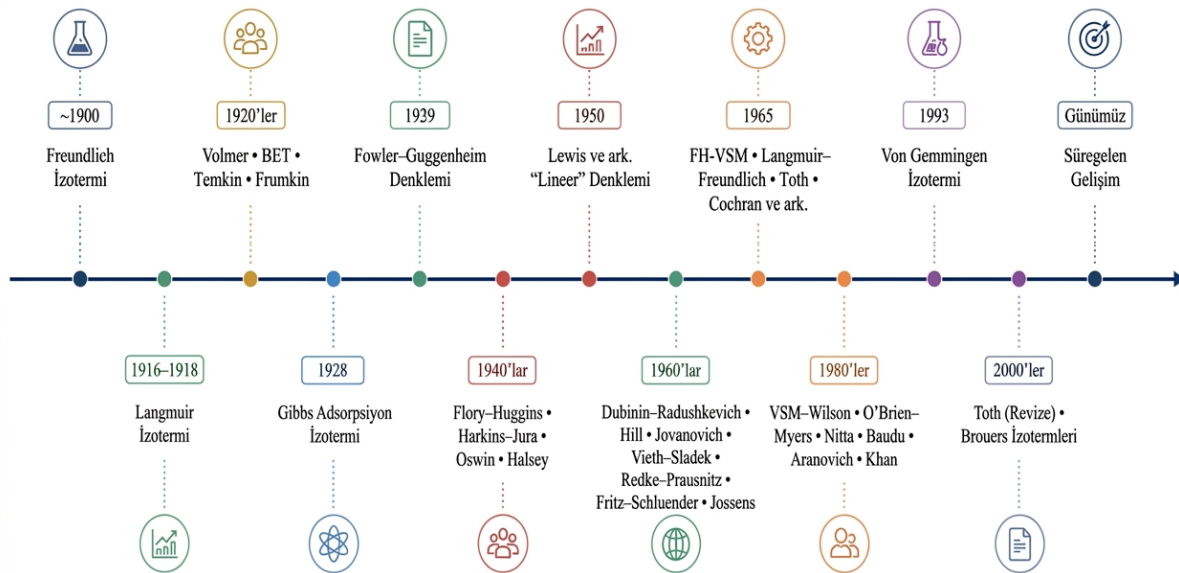
Kriter	Pseudo Birinci Derece	Pseudo İkinci Derece	Parçacık İçi Difüzyon
Temel denklem	$dq/dt = k_1(q_e - q_t)$	$dq/dt = k_2(q_e - q_t)^2$	$q_t = k_i \cdot t^{1/2} + C$
Doğrusal form	$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 \cdot t$	$t / q_t = 1 / (k_2 q_e^2) + t / q_e$	$q_t = k_i \cdot t^{1/2} + C$
Temel parametreler	k_1 (dk^{-1}): birinci derece hız sabiti; q_e : denge adsorpsiyon kapasitesi	k_2 ($g \text{ mg}^{-1} dk^{-1}$): ikinci derece hız sabiti; q_e : denge adsorpsiyon kapasitesi; $h = k_2 q_e^2$: başlangıç adsorpsiyon hızı	k_i ($mg/g dk^2$): parçacık içi difüzyon hız sabiti; C: sınır tabakası kalınlığıyla ilişkili sabit
Grafik yöntemi	$\log(q_e - q_t)$ ile t arasında doğrusal grafik; eğimden k_1 , kesimden q_e hesaplanır:	t/q_t ile t arasında doğrusal grafik; eğimden q_e , kesimden k_2 hesaplanır	q_t ile $t^{1/2}$ arasında grafik çizilir; doğrusallık kontrol edilir; orijinden geçmemesi dış kütle transferinin de etkili olduğunu gösterir
Temel varsayım	Adsorpsiyon hızı, dolmamış yüzey alanıyla orantılıdır; fiziksel adsorpsiyon ağırlıklıdır	Kimyasal adsorpsiyon hız belirleyici basamaktır; elektron paylaşımı veya değişimi söz konusudur	Adsorpsiyon hızı yalnızca parçacık içi difüzyonla sınırlandırılmıştır; çok aşamalı süreç mümkündür

Uygulandığı süreç	Adsorpsiyonun başlangıç aşamasında; yüksek başlangıç konsantrasyonlarında ve yüzey aktif bölgelerinin sınırlı olduğu sistemlerde	Metal iyonları, boyar maddeler ve organik kirleticilerin adsorpsiyonunda; uzun denge sürelerinde	Gözenekli adsorbentlerde (aktif karbon, zeolit, biyokömür); difüzyon kontrolünün test edilmesinde
Avantajları	Hesaplama basitliği; başlangıç kinetik davranışını iyi tanımlar	qe deneysel değerle örtüşür; kemisorpsiyon mekanizmasını açıklar; en yaygın kullanılan model	Hız belirleyici adımı ortaya koyar; çok aşamalı difüzyon mekanizmasını aydınlatır
Sınırlılıkları	qe değeri deneysel qe ile örtüşmeyebilir; uzun süreli verileri zayıf temsil eder	Yüksek konsantrasyonlarda başlangıç hızını hafifçe abartabilir	Tek başına yeterli değildir; diğer modellerle birlikte yorumlanmalıdır; grafikte çoklu doğrusal bölgeler oluşabilir
Referans	(Ho, 2004; Lagergren, 1898; Musah vd., 2022; Wang vd., 2024).	(Ho & Mckay, 1999; Ho, 2006; Simonin, 2016).	(Largitte ve Pasquier, 2016; Qiu vd., 2009; Weber ve Morris, 1963).

3.5. Adsorpsiyon İzoterm Modelleri

Sulu çözeltilerden kirleticilerin uzaklaştırılmasında, özellikle atık su sistemlerinde sıklıkla karşımıza çıkan farmasötik mikro kirleticilerin gideriminde en kritik basamak, sistem için hem ekonomik hem de yüksek verimliliğe sahip optimum adsorbentin seçilmesidir (Ouyang vd., 2020). Bu seçimi takiben, katı-sıvı fazları arasındaki kütle transfer mekanizmalarını ve adsorbent-adsorbat arayüzündeki mikroskobik etkileşimleri net bir şekilde tanımlayabilmek adına adsorpsiyon izoterm modellerinin matematiksel analizine başvurulur (Ayawei vd., 2017). İzoterm çalışmaları; sistemin denge anındaki davranışını, maksimum tutunma kapasitesini ve kirletici moleküllerinin katı yüzeyine dağılım geometrisini belirleyerek endüstriyel ölçekteki proseslerin optimize edilmesine doğrudan olanak tanır (Foo ve Hameed, 2010).

Çevre mühendisliği ve ayırma teknolojilerindeki bu kritik önemi nedeniyle, literatürde adsorpsiyon dengelerinin modellenmesine yönelik kapsamlı teorik ve ampirik çalışmalar yürütülmüştür. Çevre mühendisliği ve ayırma teknolojilerindeki bu kritik önemi nedeniyle, literatürde adsorpsiyon dengelerinin modellenmesine yönelik kapsamlı teorik ve ampirik çalışmalar yürütülmüştür. Geçmişten günümüze geliştirilen ve farklı yüzey kabullerini temel alan bu izoterm yaklaşımlarının tarihsel ve kronolojik gelişim evreleri Şekil 3.2.'de gösterilmiş ve Çizelge 3.4.'de detaylandırılmıştır.



Şekil 3.2. İzoterm yaklaşımlarının kronolojik gelişim evreleri

Çizelge 3.4. Yıllar içinde geliştirilen adsorpsiyon izoterm modelleri

Yıl / Adsorpsiyon Dönem izotermi / model	Temel yaklaşım ve özellikleri
1906 Freundlich izotermi	Ampirik bir modeldir; heterojen yüzeylerde adsorpsiyonu ve yüzeydeki farklı adsorpsiyon enerjilerini temsil etmek amacıyla kullanılır. Mozaffari Majd vd. modeli Freundlich (1906)'ya dayandırmaktadır.
1918 Langmuir izotermi	Kinetik yaklaşıma dayalıdır; adsorpsiyon ve desorpsiyon hızlarının eşit olduğu dinamik denge kabulünü esas alır. Homojen yüzey üzerinde tek tabakalı adsorpsiyonu ve ihmal edilebilir moleküller arası etkileşimleri varsayar.
1925 Frumkin izotermi	Adsorplanmış türler arasındaki etkileşimleri dikkate alan yüzey adsorpsiyon yaklaşımıdır. Mozaffari Majd vd. Frumkin modelini 1925 tarihli çalışmaya dayandırmaktadır.
1925 Volmer izotermi	Adsorpsiyon dengesinin termodinamik olarak ifade edilmesine yönelik erken dönem modellerden biridir; Mozaffari Majd vd.'nin kaynakçasında Volmer'in özgün çalışması 1925 olarak verilmektedir.
1928 Gibbs adsorpsiyon yaklaşımı (de Boer)	Adsorpsiyon izotermlerinin türetilmesinde kullanılan termodinamik yaklaşımın önemli temellerinden biridir. Malek ve Farooq, Gibbs adsorpsiyon izotermi yaklaşımını de Boer (1928) ile ilişkilendirmektedir.
1938 Brunauer–Emmett–Teller (BET) izotermi	Çok moleküllü/çok tabakalı fiziksel adsorpsiyon teorisine dayalıdır; özellikle gaz-katı adsorpsiyon sistemleri için geliştirilmiştir.
1939 Fowler–Guggenheim modeli	İstatistiksel termodinamik yaklaşım içerisinde ele alınır ve adsorplanmış moleküller arasındaki etkileşimleri dikkate alır. Malek ve Farooq modeli Fowler ve Guggenheim'in 1939 çalışmasına dayandırmaktadır.

(Malek ve Farooq, 1996; Mozaffari Majd vd., 2022).

Yürütülen bu araştırma kapsamında da denge verilerinin teorik uygunluğunu doğrulamak amacıyla; literatürde en yaygın kullanılan temel modellerden Langmuir ve Freundlich eşitliklerinin yanı sıra Temkin, Redlich-Peterson (R-P) ve Dubinin-Radushkevich (D-R) izoterm modelleri seçilerek derinlemesine analiz edilmiştir.

3.5.1. Langmuir izoterm modeli

Literatürde katı-sıvı adsorpsiyon mekanizmalarının aydınlatılmasında en çok tanınan teorik yaklaşımlardan biri Langmuir izoterm modelidir. İlk olarak gaz-katı faz etkileşimlerini açıklamak üzere türetilen bu model, günümüzde farklı adsorbent ve biyosorbentlerin performans dinamiklerini kıyaslamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Vijayaraghavan vd., 2006). Bu teorik modelin arkasındaki temel matematiksel çıkarım, katı bir arayüzeyde gerçekleşen kararlı kütle transferinin aslında dinamik bir kinetik prensibe dayandığını savunur. Bu yaklaşıma göre süreç; çözeltideki akışkan moleküllerinin sürekli olarak katı yüzeyini bombalamasıyla oluşan adsorpsiyon hızı ile yüzeye tutunmuş moleküllerin tekrar sıvı faza geri dönmesini ifade eden desorpsiyon hızının dinamik bir şekilde eşitlenmesi esasına dayanır. Sistem denge noktasına ulaştığında, net birikim oranı sıfırlanmakta ve yüzeydeki madde transferi kararlı bir hal almaktadır (Al-Ghouti ve Da'ana, 2020).

Modelin temelini oluşturan bu dinamik denge süreci, Irving Langmuir'in ortaya koyduğu belirli yapısal kabullere dayanmaktadır. Bu varsayımlara göre, adsorpsiyonun gerçekleştiği katı yüzeyi tamamen homojendir; tüm aktif bölgeler enerjik açıdan eşdeğer özelliktedir ve aynı bağlanma mekanizmasıyla çalışır. Yüzeydeki her aktif merkez en fazla bir adet adsorbat molekülü tutabildiği için süreç neticede tek katmanlı (monolayer) bir tabaka oluşumuyla sınırlı kalır. Ayrıca, komşu bölgelerde tutulan moleküller arasında hiçbir yanal etkileşimin bulunmadığı kabul edilir. Sürecin başında yüzeye çarpan moleküller boş alanlara zayıf etkileşimlerle tutunurken, adsorpsiyon ilerledikçe katı üzerindeki boş yerlerin tükenmesiyle birlikte sistem kararlı bir doygunluk platosuna ulaşır (Langmuir, 1916; Ouyang vd., 2020).

Matematiksel olarak Langmuir izoterm modeli, denge anındaki sistem davranışlarını tanımlamak amacıyla Formül F.4'teki gibi gösterilmektedir:

$$q_e = \frac{q_m \times K_L \times C_e}{1 + K_L \times C_e} \quad (F.4)$$

Burada;

q_e ; Dengede birim adsorbent kütlesi başına tutulan kirletici miktarını (mg/g),

C_e ; Adsorpsiyon prosesi tamamlandıktan sonra çözeltide kalan bakiye adsorbat konsantrasyonunu (mg/L),

K_L ; Adsorbent ile adsorbat arasındaki bağlanma eğilimini gösteren Langmuir afinite sabitini (L/mg),

q_m ; Katı yüzeyinde oluşan tek tabakalı maksimum adsorpsiyon kapasitesini (mg/g) temsil etmektedir.

DeneySEL verilerin bu modele uygunluğunu test etmek ve karakteristik sabitleri belirlemek amacıyla, denklemin lineerleştirilmiş formu kullanılarak C_e değerlerine karşı C_e / q_e grafiğı oluşturulur. Elde edilen doğrusal grafiğın eğimi ve eksenı kestiğı nokta üzerinden sisteme ait q_m ve K_L parametreleri hesaplanır. İlave olarak, modelden elde edilen bu veriler kullanılarak prosesin işletimsel açıdan ne kadar verimli olduğunu ortaya koyan boyutsuz ayırma faktörü (R_L) hesaplanabilmektedir. Başlangıç konsantrasyonuna (C_0) bağılı olarak hesaplanan bu kriter, $R_L = 1/(1 + K_L.C_0)$ bağıntısıyla bulunur. Sistemin doğasını tayin eden bu boyutsuz parametrenin sayısal değeri; $R_L > 1$ olduğunda prosesin elverişsiz, $R_L = 1$ durumunda doğrusal, $0 < R_L < 1$ aralığında elverişli (uygun) ve $R_L = 0$ değerinde ise adsorpsiyonun geri dönüşümsüz (tersinmez) bir mekanizmayla yürüdüğünü kesin olarak doğrulamaktadır (Foo ve Hameed, 2010; Wang vd., 2024). Langmuir izoterm modeline ait parametreler Çizelge 3.5'te listelenmiştir.

Çizelge 3.5. Langmuir izoterm modeline ait parametreler

İzoterm Modeli	Langmuir İzoterm Modeli
Temel Denklem	$q_e = \frac{q_m \times K_L \times C_e}{1 + K_L \times C_e}$
Doğrusal Form	$C_e / q_e = 1 / q_m K_L + C_e / q_m$ (Grafik: C_e / q_e vs C_e)
Temel Parametreler	C_e : Bakiye denge konsantrasyonu (mg/L) q_e : Dengede birim adsorbent başına tutulan madde (mg/g) q_m: Maksimum tek tabaka kapasitesi (mg/g) K_L: Langmuir afinite sabiti (L/mg)
Temel Varsayım	Adsorbent yüzeyi tamamen homojendir. Tüm aktif bölgeler enerjik olarak eşdeğerdir. Yanal etkileşim yoktur. Tek katmanlı (monolayer) kaplanma ile sınırlıdır.
Önemli Türetilmiş Parametre	Boyutsuz Ayırma Faktörü (R_L): $R_L = 1 / (1 + K_L \cdot C_0)$ $R_L > 1$: Elverişsiz $R_L = 1$: Doğrusal $0 < R_L < 1$: Elverişli (Uygun) $R_L = 0$: Geri dönüşümsüz
Avantajları	Farklı adsorbentlerin maksimum kapasitelerini (q_m) kıyaslamak için standart ve pratik bir araçtır. Matematiksel olarak basittir.
Sınırlılıkları	Gerçek sistemlerdeki yüzey heterojenliğini ve moleküller arası yanıl etkileşimleri ihmal eder. Çok katmanlı yapılarda başarısızdır.

3.5.2. Freundlich izoterm modeli

Tamamen ampirik verilere dayalı olarak geliştirilen Freundlich izoterm modeli, Langmuir modelinin aksine heterojen katı yüzeylerinde gerçekleşen çok katmanlı (multilayer) adsorpsiyon mekanizmalarını tanımlamak amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu teorik yaklaşıma göre, adsorbent yüzeyinde yer alan aktif merkezler enerjik açıdan simetrik olmayıp, heterojen bir enerji dağılımına sahiptir (Silva vd., 2013; Yousef vd., 2011). Dolayısıyla, adsorpsiyon süreci boyunca en yüksek enerjiye sahip kararlı bölgeler ilk olarak dolmakta, süreç ilerledikçe ve katı yüzeyi kaplandıkça daha düşük enerjili merkezler devreye girmektedir. Matematiksel olarak sistem dengesini ifade eden ampirik Freundlich denklemi D.5'teki gibi gösterilmektedir.

$$q_e = K_F C_e^{1/n_F} \quad (D.5)$$

Burada;

q_e : Denge de birim adsorbent kütlesi başına adsorbe edilen kirletici miktarını (mg/g),

C_e : Adsorpsiyon denge durumuna ulaştığında çözeltide kalan bakiye adsorbat derişimini (mg/L),

K_F : Adsorbentin yaklaşık adsorpsiyon kapasitesini gösteren Freundlich izoterm sabitini (mg/g)(L/mg)^{1/n}),

n_F : Adsorpsiyonun itici gücünü ve yoğunluğunu temsil eden boyutsuz parametreyi ifade etmektedir.

Deneyssel verilerin bu ampirik modele olan yatkınlığını test etmek amacıyla, orijinal denklemin logaritmik olarak doğrusallaştırılmış formu kullanılır ve deneyssel log C_e değerlerine karşı log q_e değerleri grafiksel olarak incelenir. Çizilen doğrusal grafiğin eğiminden $1/n_F$ değeri, ekseni kestiği noktadan ise log K_F abiti hesaplanmaktadır. Literatürde "heterojenlik faktörü" olarak adlandırılan $1/n_F$ değeri katı yüzeyinin enerji dağılımı hakkında doğrudan bilgi vermekte olup genellikle 0 ile 1 arasında değişir. Bu parametrenin sıfıra yaklaşması katı yüzeyinin yüksek derecede heterojen bir yapıya sahip olduğunu kesin olarak doğrulamaktadır (Al-Ghouti ve Da'ana, 2020). Freundlich İzoterm Modeline Ait Parametreler Çizelge 3.6'da listelenmiştir.

Çizelge 3.6. Freundlich izoterm modeline ait parametreler

İzoterm Modeli	Freundlich İzoterm Modeli
Temel Denklem	$q_e = K_F C_e^{1/n_F}$
Doğrusal Form	$\ln q_e = \ln K_F + (1/n) \ln C_e$ (Grafik: $\ln q_e$ vs $\ln C_e$)
Temel Parametreler	K_F : Yaklaşık adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)(L/mg) ^{1/n}) n_F : Adsorpsiyon yoğunluğu/itici gücü parametresi
Temel Varsayım	Adsorbent yüzeyi heterojendir. Aktif merkezler simetrik olmayan enerji dağılımına sahiptir. Çok katmanlı (multilayer) adsorpsiyon gerçekleşir. Önce yüksek enerjili bölgeler dolar.
Önemli Türetilmiş Parametre	Heterojenlik Faktörü ($1/n_F$): Genellikle 0 ile 1 arasındadır. Sıfıra yaklaşması, yüzeyin yüksek derecede heterojen bir yapıya sahip olduğunu doğrular.
Avantajları	Gerçekçi (heterojen) yüzeyleri ve karmaşık biyosorpsiyon süreçlerini başarılı şekilde simüle eder.
Sınırlılıkları	Tamamen ampirik verilere dayalıdır; sistemin teorik maksimum adsorpsiyon kapasitesi (q_m) hakkında doğrudan bilgi vermez.

3.5.3. Temkin izoterm modeli

Ampirik bir model olan Temkin yaklaşımına göre adsorpsiyon süreci boyunca adsorbent yüzeyi ile adsorbat tanecikleri arasındaki etkileşimlerden ötürü, tabakadaki tüm moleküllerin adsorpsiyon ısısının doğrusal bir azalım gösterdiğini varsayar (Silva vd., 2013). İlgili matematiksel ifadede yer alan b_T parametresi Temkin izoterm sabitini temsil ederken, A_T ise denge durumundaki bağlanma sabitini göstermektedir.

$$qe = \frac{RT}{b_T} \ln (A_T C_e) \quad (D.6)$$

Bu eşitliğin doğrusallaştırılmış formu kullanılarak, $\ln C_e$ bağımsız değişkenine karşı q_e değerleri grafiğe geçirilir. Elde edilen doğrusal grafiğin eğiminden B sabiti ($B = RT/b_T$), eksenini kestiği noktadan (orijinden kayma miktarı) ise $B \ln A_T$ değeri hesaplanır (Temkin, 1940). Temkin izoterm modeline ait parametreler Çizelge 3.7’de sunulmuştur.

Çizelge 3.7. Temkin izoterm modeline ait parametreler

İzoterm Modeli	Temkin İzoterm Modeli
Temel Denklem	$qe = \frac{RT}{b_T} \ln (A_T C_e)$
Doğrusal Form	$qe = \frac{RT}{b_T} \ln (A_T C_e)$ (Grafik: qe vs $\ln C_e$)
Temel Parametreler	A_T : Denge durumundaki bağlanma sabiti (L/g) b_T : Temkin izoterm sabiti (J/mol) B : Isı değişimiyle ilişkili sabit (RT/b_T)
Temel Varsayım	Adsorbent ve adsorbat molekülleri arasındaki etkileşimden dolayı tabakadaki tüm moleküllerin adsorpsiyon ısısı doğrusal olarak azalır. Bağlanma enerjilerinin tek tip dağılımı söz konusudur.
Önemli Türetilmiş Parametre	Adsorpsiyon ısısı $B=(RT/b_T)$: Gaz sabiti (R) ve sıcaklığa (T) bağlı olarak sistemin termal enerji değişim karakteristiğini gösterir
Avantajları	Adsorpsiyon ısısındaki değişimi doğrudan hesaba katarak moleküller arası fiziksel etkileşimleri iyi açıklar.
Sınırlılıkları	Aşırı yüksek veya aşırı düşük konsantrasyon sınırlarında deneysel verilerden sapma gösterir.

3.5.4. Dubinin-Radushkevich (D-R) izoterm modeli

Temelini Polanyi'nin potansiyel teorisinden alan Dubinin-Radushkevich (D-R) modeli, klasik katmanlı yüzey kaplanması teorilerinin aksine, mikrogözenekli yapılardaki adsorpsiyonun gözenek doldurma mekanizmasıyla gerçekleştiğini varsayar. Bu teorik yaklaşımından ötürü model, özellikle van der Waals gibi zayıf fiziksel etkileşimlerin baskın olduğu mikrogözenekli adsorbent sistemlerinin davranışını açıklamada oldukça başarılı sonuçlar vermektedir (Dubinin ve Radushkevich, 1947).

D-R modelinin matematiksel ifadesi şu şekildedir:

$$\ln q_e = \ln q_m - \beta \epsilon^2 \quad (D.7)$$

Eşitlikte yer alan $\ln q_e$ değeri adsorbentin maksimum adsorpsiyon kapasitesini (mg/g) gösterirken β terimi adsorpsiyon ortalama serbest enerjisiyle ilişkili olan D-R izoterm sabitini (mol^2/kJ^2) ifade eder. Denklemdaki Polanyi potansiyeli (ϵ) ise şu bağıntıyla hesaplanır:

$$\epsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{c_e} \right) \quad (D.8)$$

Deneyssel veriler doğrultusunda ϵ^2 değerlerine karşı $\ln q_e$ grafiğe geçirildiğinde elde edilen doğrunun y-kesim noktası bize $\ln q_m$ değerini, eğimi ise β sabitini verir (Dabrowski, 2001). Buradan hesaplanan β sabiti kullanılarak, sürecin molekül başına düşen ortalama serbest enerjisi

(E, kJ/mol) aşağıdaki formülle türetilir:

$$E = \frac{1}{\sqrt{2\beta}} \quad (D.9)$$

Bu serbest enerji değerinin 8 kJ/mol'den küçük çıkması sürecin fiziksel adsorpsiyonla, 8 ile 16 kJ/mol arasında olması iyon değişimiyle, 16 kJ/mol'den büyük çıkması ise güçlü bir kimyasal adsorpsiyonla (kemisorpsiyon) kontrol edildiğini ortaya koyar (Hu ve Zhang, 2019). Dubinin-Radushkevich (D-R) İzoterm Modeline Ait Parametreler Çizelge 3.8'de sunulmuştur.

Çizelge 3.8. Dubinin-Radushkevich (D-R) izoterm modeline ait parametreler

İzoterm Modeli	Dubinin-Radushkevich (D-R) İzoterm Modeli
Temel Denklem	$q_e = q_m \exp (-\beta \varepsilon^2)$
Doğrusal Form	$\ln q_e = \ln q_m - \beta \varepsilon^2$ (Grafik: $\ln q_e$ vs ε^2)
Temel Parametreler	q_m : Maksimum gözenek doluluk kapasitesi (mg/g) β : Serbest enerjiyle ilişkili D-R sabiti (mol^2/kJ^2) ε : Polanyi potansiyeli; $\varepsilon = RT \ln(1+1/C_e)$
Temel Varsayım	Klasik katmanlı yüzey kaplanmasının aksine, mikrogözenekli yapılardaki adsorpsiyon gözenek doldurma (pore-filling) mekanizmasıyla gerçekleşir. Polanyi potansiyel teorisine dayanır.
Önemli Türetilmiş Parametre	Ortalama Serbest Enerji (E): $E = \frac{1}{\sqrt{2\beta}}$ $E < 8 \text{ kJ/mol}$: Fiziksel adsorpsiyon $E = 8-16 \text{ kJ/mol}$: İyon değişimi $E > 16 \text{ kJ/mol}$: Güçlü kimyasal adsorpsiyon
Avantajları	Adsorpsiyonun fiziksel mi, iyon değişimi mi yoksa kimyasal mı olduğunu (E parametresiyle) kesin olarak tayin eder.

Sınırlılıkları

Genellikle sadece mikrogözenekli yapılar ve van der Waals gibi zayıf etkileşimlerin baskın olduğu sistemler için geçerlidir.

3.5.5. Redlich-Peterson izoterm modeli

Langmuir ve Freundlich yaklaşımlarının tek bir matematiksel yapıda birleştirilmesiyle türetilen Redlich-Peterson eşitliği, iki parametrelili geleneksel izotermelerin yetersiz kaldığı durumları açıklamak üzere önerilmiş üç parametrelili ampirik bir modeldir (Redlich ve Peterson, 1959). Söz konusu bağıntı, dar veya geniş fark etmeksizin oldukça esnek bir konsantrasyon aralığında geçerlilik gösterdiğinden hem homojen hem de heterojen karakterdeki adsorpsiyon sistemlerinin teorik davranışını simüle etmede güçlü bir araçtır (Gimbert vd., 2008). Modelin doğrusallaştırılmış formu ise Denklem D.10'daki bağıntıyla ifade edilir:

$$\ln\left(K_{RP} \frac{C_c}{q_e} - 1\right) \ln(\alpha_{RP} + \beta \ln(C_e)) \quad (D.10)$$

DeneySEL veriler doğrultusunda $\ln$ değerlerine karşı $\ln(K_{RP} \frac{C_c}{q_e} - 1)$ grafiğe geçirildiğinde elde edilen doğrunun eğiminden β parametresi, kesim noktasından ise α_{RP} sabiti hesaplanır (Cazetta vd., 2011). Redlich-Peterson izoterm modeline ait parametreler Çizelge 3.9'da sunulmuştur.

Çizelge 3.9. Redlich-Peterson izoterm modeline ait parametreler

İzoterm Modeli	Redlich Peterson İzoterm Modeli
Temel Denklem	$q_e = K_{RP} C_e / (1 + \alpha_{RP} C_e^\beta)$
Doğrusal Form	$\ln(K_{RP} \frac{C_e}{q_e} - 1) = \ln \alpha_{RP} + \beta \ln C_e$ (Grafik: $\ln(K_{RP} \frac{C_e}{q_e} - 1)$ vs $\ln C_e$)
Temel Parametreler	K_{RP} : R-P doğrusal bölge afinite sabiti (L/g) α_{RP} : R-P izoterm sabiti (L/mg) ³ β : Heterojenlik üssü (0 ile 1 arasında)
Temel Varsayım	Langmuir ve Freundlich modellerinin matematiksel birleşimidir. Düşük konsantrasyonlarda Langmuir (ideal doğrusal), yüksek konsantrasyonlarda Freundlich (heterojen çok katmanlı) davranış sergiler.
Önemli Türetilmiş Parametre	Sistem Davranış İndeksi (β): $B=1$ olduğunda denklem tamamen Langmuir modeline indirgenir ve homojen yapıyı doğrular.
Avantajları	Geniş bir konsantrasyon aralığında (hem dar hem geniş) esneklik gösterir; hem homojen hem heterojen sistemlere tam uyum sağlar.
Sınırlılıkları	Üç parametreliliği bir model olduğundan çözümü ve doğrusallaştırılması iki parametreliliğe göre daha karmaşık hesaplamalar gerektirir.

4. SU ARITIM YÖNTEMLERİ

Bugün dünyada nüfusun hızla artması ve şehirleşmenin kontrolden çıkması, temiz su kaynaklarının üzerindeki baskıyı tarihte hiç olmadığı kadar artırdı. Evlerden ve fabrikalardan çıkan atık suların miktarı her geçen gün büyürken, su kirliliği artık sadece çevresel bir sorun olmaktan çıkıp küresel bir krize dönüştü (Schwarzenbach vd., 2010). Üstelik artık sadece eski tip klasik kirleticilerle uğraşmıyoruz; doğada kolay kolay bozulmayan, suya karıştığında canlı hayatını doğrudan tehdit eden ilaç kalıntıları, antibiyotikler ve kimyasallar gibi "yeni nesil" mikrokirleticiler de karşımıza çıkıyor (Richardson ve Ternes, 2018). Bu tehlikeli maddelerin alıcı ortamlara zarar vermesini engellemek için, atık suların deşarj edilmeden önce çok sıkı standartlarda arıtılması artık bir zorunluluktur.

Atık sulardan hedef kirleticilerin uzaklaştırılması amacıyla literatürde ve endüstriyel ölçekte çok sayıda arıtım teknolojisi geliştirilmiştir. Bu yöntemler genel olarak fiziksel, kimyasal ve biyolojik esaslı geleneksel yaklaşımlardan, son yıllarda geliştirilen ileri ve hibrit teknolojilere kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır (Crini ve Lichtfouse, 2019). Geleneksel yöntemler büyük hacimli suları ucuza arıtmakta hala başarılı olsa da, iş suyun içinde tamamen çözünmüş halde bulunan ve biyolojik olarak parçalanmaya direnç gösteren zorlu moleküllere (özellikle de antibiyotiklere) geldiğinde çaresiz kalmaktadır. Tam da bu yüzden, sudaki bu inatçı mikrokirleticileri yakalamak için membran sistemleri, gelişmiş oksidasyon prosesleri ve elektrokimyasal yöntemler gibi daha modern ve hedef odaklı teknolojiler ön plana çıkmaktadır (Grandclément vd., 2017). Literatürde en çok kabul gören ve bu mekanizmalarla çalışan temel arıtma teknolojileri şu şekilde sıralanabilir:

4.1. Membran Filtrasyon Teknolojileri

Membran filtrasyonu, atık suyun içindeki kirleticileri herhangi bir kimyasal değişime uğratmadan, sadece moleküler boyutlarına ve fiziksel özelliklerine göre ayıran basınç odaklı bir arıtma teknolojisidir (Snyder vd., 2007). Bu yaklaşımın temel mantığı, sıvı fazdaki hem canlı mikroorganizmaları hem de askıdaki cansız partikülleri fiziksel olarak ortamdaki uzaklaştırarak berrak ve steril bir çıkış suyu elde etmektir. Sürecin seçiciliği tamamen filtre üzerindeki gözeneklerin mikron düzeyindeki çaplarıyla kontrol edilir. Sistem tıpkı hassas bir elek gibi davranarak, hedef kirleticilerin boyutuna göre bir ayırım yapar; gözeneklerden küçük olan yapılar sıvı akışıyla birlikte sistemden geçerken, bu boşluklara sığmayacak kadar büyük ve karmaşık moleküller filtrenin üzerinde tutulur (McKinnon ve Avis, 1993).

Literatürde gözenek boyutlarına göre mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters ozmoz (RO) olmak üzere dört temel membran sınıfı bulunmaktadır. Atık sulardaki

Amoksisilin gibi farmasötik mikrokirleticilerin uzaklaştırılması söz konusu olduğunda, bu geniş yelpazeden özellikle ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyon süreçleri ön plana çıkmaktadır (Benitez vd., 2011).

Ultrafiltrasyon, yaklaşık 0,002–0,1 µm aralığında gözenek çapına ve 10,000–100,000 Da moleküler ağırlık kesim değerine (MWCO) sahip membranlar aracılığıyla çalışır. Bu özellikler sayesinde sistem; kolloidler, yüksek moleküler ağırlıklı proteinler ve askıdaki katılar gibi büyük yapıları etkin biçimde tutabilir (Zinicovscaia ve Cepoi, 2016). Ne var ki Amoksisilin gibi düşük moleküler ağırlıklı farmasötik bileşikler (AMX, MW $\approx$ 365 Da) membran gözeneklerinin çok altında kaldığından, UF bu tür mikrokirleticileri tek başına yeterince uzaklaştıramamaktadır; literatür bulgularına göre ilaç giderim verimliliği çoğunlukla %50'nin altında kalmaktadır (Dolar ve Košutić, 2013).

Nanofiltrasyon, 0,5–2 nm gözenek boyutu ve 100–2000 Da MWCO aralığıyla ultrafiltrasyondan çok daha ince bir ayırım çizgisi çizer. Ayırım mekanizması salt boyuta dayalı bir eleme etkisiyle sınırlı kalmayıp, membranın yüzey yükü ve kirletici ile membran arasındaki elektrostatik etkileşimler de belirleyici rol oynar. Bu çok bileşenli mekanizma sayesinde Amoksisilin gibi farmasötik bileşikler için %90'ın üzerinde giderim verimlilikleri rapor edilmiştir (Homayoonfal ve Mehrnia, 2014). Bununla birlikte yüksek işletme basıncı gerektirmesi (6–10 bar) ve membran kirlenme (fouling) problemi, NF'nin pratik uygulamalarındaki başlıca kısıtlayıcı etkenler arasında yer almaktadır (Wu vd., 2022).

Ters ozmoz, 0,001 µm'nin altındaki gözenek boyutu ve 100 Da'nın altındaki MWCO değeriyle membran teknolojilerinin en yoğun ve seçici basamağını oluşturur. Farmasötik kirleticilerin uzaklaştırılmasında RO'nun %90'ın üzerine çıkan, bazı durumlarda %99'u aşan giderim değerleri sağladığı bildirilmektedir (Gupta vd., 2024). Ancak bu yüksek performans, beraberinde önemli bir enerji maliyeti getirir; sistemin çalışması için gereken yüksek transmembran basınç (14–70 bar), işletme giderlerini ve karbon ayak izini artırır. Ayrıca RO işlemi sonucunda oluşan konsantre (retantat) akımının güvenli biçimde bertaraf edilmesi gerekliliği, bu teknolojinin çevre yönetimi açısından çözülmesi gereken ayrı bir boyutunu oluşturmaktadır (Khoo vd., 2022).

4.2. İleri Oksidasyon Prosesleri (İOP / AOPs)

İleri oksidasyon prosesleri, atık suda bulunan kalıcı organik kirleticileri yalnızca fiziksel olarak uzaklaştırmak yerine kimyasal yapılarını parçalayarak etkisiz hâle getirmeyi amaçlayan bir yöntemler bütünüdür. Bu proseslerin ortak paydasını, son derece yüksek oksidasyon potansiyeline ($E^{\circ} \approx 2,8$ V) sahip hidroksil radikallerinin ($\bullet\text{OH}$) in situ olarak üretilmesi oluşturur. Söz konusu

reaktif türler, hedef organik moleküllerle seçici olmayan, hızlı ve zincir tepkimeli bir saldırı başlatarak bileşiği önce daha küçük ara ürünlere, ardından ise ideal koşullarda CO₂ ve H₂O gibi mineralize son ürünlere dönüştürür. Bu özelliğiyle ileri oksidasyon prosesleri, biyolojik arıtma veya membran yöntemlerine kıyasla molekülü tamamen tahrip edebildiğinden, biyolojik olarak ayrışmaya dirençli farmasötik bileşiklerin gideriminde özellikle tercih edilen bir yaklaşım hâline gelmiştir (Iqbal vd., 2024). Literatürde yer alan bir çalışmada, güneş ışığı destekli Foto-Fenton prosesinin ilaç kalıntıları üzerindeki etkinliği araştırılmış; Amoksisilin ve parasetamolün bozunma oranları yapay atık sularda %90'ı aşarken, gerçek arıtma tesisi deşarj sularında bu değerin %80 civarında kaldığı rapor edilmiştir (Hinojosa Guerra vd., 2019).

4.2.1. Ozonlama (Ozonation)

Ozonlama, güçlü bir oksidan olan ozon molekülünün (O₃) atık su içindeki organik kirleticilerle ya doğrudan moleküler düzeyde ya da pH'a bağlı olarak açığa çıkan •OH radikalleri aracılığıyla dolaylı biçimde tepkimeye girmesi esasına dayanır. Asidik ortamlarda doğrudan ozon atağı baskınken, alkalın koşullarda ozon bozularak hidroksil radikali üretimine yol açar ve bu durum sistemi daha güçlü bir oksidana dönüştürür (Kanakaraju vd., 2025). Model hastane atık sularında Amoksisilin giderimini araştıran Aleksić ve çalışma arkadaşları, ozonlamanın Amoksisilin gideriminde oldukça etkili olduğunu ve bazık koşullarda (pH 10,85) H₂O₂ destekli O₃ prosesiyle %99'a varan giderim sağlandığını bildirmiştir. Ayrıca H₂O₂ ilavesinin hidroksil radikali oluşumunu hızlandırarak antibiyotiklerin bozunmasını artırdığı ve bu nedenle O₃/H₂O₂ sisteminin antibiyotik içeren atık suların arıtımında etkili bir yaklaşım olduğu ortaya konmuştur (Aleksić vd., 2021). Fakat bununla birlikte ozonlamanın en önemli kısıtı, yüksek enerji tüketimi ve ozonun kendisinin kararsız bir gaz olması nedeniyle taşıma ve depolama güçlükleridir.

4.2.2. Fenton ve foto-fenton prosesi

Fenton prosesi, Fe²⁺ iyonlarının hidrojen peroksit (H₂O₂) ile katalize ettiği bir tepkime aracılığıyla •OH radikali üretir: $Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + \bullet OH + OH^-$. Oluşan hidroksil radikalleri, Amoksisilin gibi antibiyotiklerin β-laktam halkasını ve diğer fonksiyonel gruplarını hızla parçalar. Klasik Fenton prosesinin optimal çalışma pH'ı dar ve asidiktir (pH ≈ 2,8–3,5); bu durum, gerçek atık su matrikslerindeki uygulamalarda işletme maliyetlerini artıran bir pH ayarlama zorunluluğu doğurur. Foto-Fenton prosesinde ise sisteme UV ışınması eklenerek Fe³⁺'ün yeniden Fe²⁺'ye indirgenmesi hızlandırılır ve böylece •OH üretim hızı artırılarak daha kısa sürede ve daha düşük reaktif dozunda yüksek giderim verimlilikleri elde edilebilir (Całus-Makowska vd., 2025). Ay ve Kargı (2010), Box-Behnken istatistiksel tasarım modeli kullanarak yürüttükleri Fenton oksidasyonu çalışmasında, Amoksisilin molekülünün 2,5 dakika gibi kısa bir sürede tamamen

(%100) parçalandığını rapor etmişlerdir. Ancak araştırmacılar, ana kirleticinin tamamen yok olmasına rağmen, ortamda Fenton reaktifine karşı dirençli ara ürünlerin oluşması sebebiyle toplam organik karbon (TOC) gideriminin %37 düzeyinde kaldığını ve tam mineralizasyonun sağlanamadığını önemle vurgulamışlardır (Ay ve Kargi, 2010).

4.2.3. Fotokataliz (TiO₂/UV)

Heterojen fotokataliz, bir yarı iletken katalizörün (en yaygın kullanılanı TiO₂) UV ya da görünür ışık enerjisiyle uyarılarak yüzeyinde elektron-deşik (e^-/h^+) çifti oluşturması ve bu çiftlerin su ile oksijen molekülleriyle tepkimeye girerek reaktif oksijen türleri (ROS) üretmesi ilkesine dayanır. Üretilen $\bullet OH$ radikalleri ve süperoksit anyonları ($\bullet O_2^-$), çözeltideki hedef organik kirleticileri mineralize eder. Bu yöntemin Fenton prosesine kıyasla en belirgin avantajı, geniş bir pH aralığında etkili olabilmesi ve demir tuzuna dayalı ikincil kirlilik riskini barındırmamasıdır (Cuerda-Correa vd., 2020). Buna karşın, katalizör yüzeyinde meydana gelen kirlenme (fouling) ve ışık penetrasyonundaki sınırlılıklar, prosesin gerçek ölçekli uygulamalardaki verimliliğini kısıtlayan başlıca teknik engellerdir (Pozzo vd., 1997). Model Amoksisilin çözeltilerinde ZnO-TiO₂ sistemiyle %94 parçalanma verimi elde eden Charafî ve ark., optimum dozun aşılması durumunda katalizör kümelenmesi ve ışık perdelenmesi gibi teknik engellerin ortaya çıktığını; ayrıca gerçek atık sulardaki çoklu kirletici rekabetinin proses verimini sınırlayabileceğini rapor etmişlerdir (Charafî vd., 2025).

4.3. Geleneksel Biyolojik Arıtma Yöntemleri

Biyolojik arıtma, atık suda çözünmüş ya da askıda bulunan organik kirleticilerin mikroorganizmalar tarafından metabolize edilerek parçalanması ilkesine dayanır. Görece düşük işletme maliyeti ve ikincil bir kimyasal girdi gerektirmemesi bu yöntemleri farmasötik atık su arıtımında sık başvurulmuş bir seçenek hâline getirmektedir (Khalidi-Idrissi vd., 2023). Biyolojik arıtma şemsiyesi altında pek çok farklı proses yer alsa da aktif çamur prosesi, dünya genelindeki atık su arıtma tesislerinde bugün hâlâ en yaygın uygulanan biyolojik teknoloji konumundadır (Chen vd., 2021).

4.3.1. Aktif çamur prosesi

Aktif çamur sistemlerinde, havalandırma havuzlarında yüksek yoğunlukta tutulan aerobik mikroorganizma toplulukları, atık sudaki organik maddeleri temel enerji ve karbon kaynağı olarak tüketerek biyolojik olarak ayrıştırır. Ancak Amoksisilin gibi β -laktam grubu antibiyotiklerin arıtımına gelindiğinde, bu süreç oldukça değişken bir performans ortaya koymaktadır. Nitekim literatürde, β -laktam antibiyotiklerin biyodegradasyon (biyolojik bozunma) verimlerinin %10 ile %90 gibi oldukça geniş bir aralıkta dağılım gösterdiği rapor edilmektedir (Zhang vd., 2021). Bu

tutarsızlığın arkasında sistemin hidrolik bekletme süresi, çamur yaşı ve giriş suyu antibiyotik derişimi gibi işletme koşullarına olan hassasiyeti yatmaktadır (Rios-Miguel vd., 2021).

Aslında aktif çamur sistemlerindeki asıl büyük problem, sadece antibiyotiğin suda kalması ya da iyi arıtilamaması değildir. Bu havuzlarda antibiyotiklere sürekli ve uzun süre maruz kalan bakteriler zamanla direnç kazanmaya başlar. Bunun sonucunda sistem içinde dirençli bakteri popülasyonları ve tehlikeli antibiyotik direnç genleri (ARG) birikerek atık suyla birlikte çevreye yayılma riski taşır (Karkman vd., 2018). Yapılan çalışmalarda, sisteme verilen Amoksisilin miktarı 500–2000 mg/L gibi yüksek seviyelere ulaştığında, sistemin kirlilik temizleme oranını gösteren Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) giderim veriminin çok ciddi şekilde düştüğü saptanmıştır. İşin daha da sıkıntılı tarafı, bu ağır antibiyotik yükü ortamdan tamamen kesilse bile, havuzdaki bakterilerin (biyokütlenin) kendini toparlayıp yeniden eski arıtma performansına dönmesi yaklaşık 35 gün gibi çok uzun bir zaman almaktadır (Burgos vd., 2025). Tüm bu bulgular, geleneksel aktif çamur prosesinin Amoksisilin içeren atık suların arıtımında tek başına yeterli ve güvenilir bir çözüm sunamadığına işaret etmektedir.

4.4. Elektrokimyasal Arıtma Yöntemleri

Elektrokimyasal arıtma sistemleri, en basit anlatımla, atık suyun içerisine daldırılan elektrotlara bir elektrik akımı verilmesi ve bu sayede sudaki kirleticilerin yapısının değiştirilmesi ya da tamamen sudan ayrılması mantığıyla çalışır. Amoksisilin gibi arıtılması zor farmasötik kalıntıların temizlenmesinde bu yöntemleri aslında oldukça kullanışlı kılan bazı önemli artılar var. Örneğin; sisteme dışarıdan sürekli ek bir kimyasal madde beslemek zorunda kalınmaması, arıtma reaktörleri çok büyük alanlar kaplamaması ve elektrik akımını açıp kapatarak tüm işletmeyi anlık olarak kolayca yönlendirilebilmesi gibi olumlu yönleri vardır (Zaied vd., 2020). Literatürde öne çıkan iki temel elektrokimyasal yaklaşım elektrokoagülasyon ve elektrokimyasal oksidasyondur.

4.4.1. Elektrokoagülasyon (EC)

Elektrokoagülasyon yönteminde sisteme verilen doğru akım, reaktördeki alüminyum ya da demir gibi feda elektrotlarının (kurbanlık anotların) zamanla aşınarak çözünmesini sağlar. Bu çözünme sonucunda suyun içinde metal hidroksit flokları (yumakları) meydana gelir ve bu yapılar Amoksisilin gibi ilaç moleküllerini yakalayıp kendisiyle birlikte dibe çöktürür. Literatürde Amoksisilin içeren yapay atık sularla yapılan bir araştırmada; pH 7 seviyesinde, 60 V gerilim uygulanarak gerçekleştirilen 75 dakikalık bir arıtım sonucunda antibiyotiğin %98,8 gibi çok yüksek bir oranda giderildiği görülmüştür (Balarak vd., 2019). Fakat elektrokoagülasyon tek başına kullanıldığında, arıtma başarısı tamamen ortamın pH'ı veya uygulanan elektrik gibi işletme koşullarına aşırı bağımlı hale gelmektedir. Nitekim sudaki Amoksisilin derişimi yükseldiğinde,

sistemin bu molekülleri yakalama kapasitesi yetersiz kalmakta ve giderim verimi %52'ler civarında tıkanmaktadır (Oulebsir vd., 2020).

4.4.2. Elektrokimyasal oksidasyon (Anodik Oksidasyon)

Elektrokimyasal oksidasyonda hedef kirleticiler, anot yüzeyinde üretilen güçlü hidroksil radikalleri ($\bullet\text{OH}$) aracılığıyla parçalanır ya da doğrudan elektron transferiyle ayrıştırılır. Bor katkılı elmas (BDD) elektrotlar, yüksek $\bullet\text{OH}$ üretim kapasitesi ve kimyasal kararlılıkları nedeniyle bu proste en çok tercih edilen anot malzemesi konumuna gelmiştir (Lozano vd., 2023). Sopaj ve ekip arkadaşları (2015) yaptıkları çalışmada, Boron Katkılı Elmas (BDD) anotun Amoksisilin'i 100 dakikadan kısa sürede tamamen temizleyip zararsız bileşenlerine kadar parçalamayı başardığını; buna karşın Boyutsal Olarak Kararlı Anot (DSA) olarak bilinen geleneksel elektrodun ise aynı sürede antibiyotiğin yarısını bile arıtamadığını ortaya koymuştur (Sopaj vd., 2015). Yüksek enerji tüketimi ve BDD elektrot üretim maliyeti ise bu teknolojinin geniş ölçekli uygulamalarındaki başlıca kısıtlayıcı etkenler olmaya devam etmektedir.

4.5. Koagülasyon - Flokülasyon (Pıhtılaştırma - Yumaklaştırma)

Geleneksel arıtma sistemlerinde sıklıkla karşımıza çıkan koagülasyon ve flokülasyon prosesleri; atık suyun içerisinde asılı kalan katı maddeleri ve çıplak gözle görülmeyen kolloidleri, ortama eklenen kimyasal maddeler yardımıyla bir araya getirip dibe çöktürme mantığına dayanır. Sisteme alüminyum ya da demir tuzları gibi inorganik yapıllı koagülanlar karıştırıldığında, sudaki kirletici partiküllerin birbirini itmesini sağlayan yüzey yükleri dengelenir ve nötrleşir. Hemen ardından uygulanan yavaş karıştırma (çalkalama) işlemiyle birlikte, bu nötrleşen küçük tanecikler birbirine yapışarak mikro flokları oluşturur; zamanla büyüyen bu yumaklar da kendi ağırlıklarıyla kolayca çökebilecek boyuta ulaşır (Crittenden vd., 2012). Fakat iş Amoksisilin gibi farmasötik mikrokirleticileri sudan temizlemeye geldiğinde, bu yöntemin başarısı maalesef çok gerilerde kalmaktadır. Literatürde geleneksel alüminyum ya da demir bazlı koagülanlar kullanılarak yapılan araştırmalar incelendiğinde; bu tür ilaç bileşiklerinin sudan arıtılma oranlarının sadece %10 ile %60 gibi oldukça düşük ve yetersiz bir aralıkta sıkışıp kaldığı görülmektedir (Łukasiewicz, 2025). Literatürde ve uygulamada sıklıkla tercih edilen farklı su arıtım yöntemlerinin öne çıkan temel özellikleri Çizelge 4.1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Farklı su arıtım yöntemlerinin temel özelliklerinin karşılaştırılması

Yöntem	Temel Mekanizma	Başlıca Avantajları	Başlıca Dezavantajları
Membran Filtrasyonu	Boyuta ve yüke dayalı fiziksel ayırma	Yüksek giderim verimi; geniş ticari pazar, kimyasal reaktif gerektirmez; minimum alan ihtiyacı; geniş arıtım yelpazesi; yüksek yapısal direnç	Yüksek işletme basıncı ve enerji tüketimi; fouling sorunu; konsantre akım bertarafı gerektirmesi; yüksek ilk yatırım; pahalı bakım ve işletim
İleri Oksidasyon Prosesleri	•OH radikalleriyle kimyasal parçalama	Molekülü tamamen mineralize edebilir; biyolojik direnç sorunu yaratmaz; Hızlı tepkime ve kısa işlem süresi; seçici olmayan arıtım ile tüm sulu kirleticileri ayırt etmeksizin parçalayabilmesi	Yüksek enerji ve reaktif maliyeti; toksik ara ürün riski; pH'a duyarlı çalışma koşulları; bakiye oksidan giderimi için ardıl işlem gerekliliği; İstikrarlı verim adına ön arıtım bağımlılığı; Yüksek debili atık sularda tek başına kullanımın ekonomik olmaması
Biyolojik Arıtma	Mikrobiyal metabolizma	Düşük işletme maliyeti ve kolay kurulum; kimyasal gerektirmediği için çevre dostu; düşük sıcaklıklarda ve yüksek yüklemelerde bile üstün giderim verimliliği; Süreç	Farmasötiğe karşı değişken ve düşük verim; antibiyotik direnç geni (ARG) yayılım riski; sistem optimizasyonu için hassas çevresel ortam gerekliliği; işletmeye alma süresinin

		sonunda metan gazı formunda değerli biyoenerji eldesi	uzunluğu; patojen ve nütrient giderim yetersizliği nedeniyle son arıtım zorunluluğu
Elektrokimyasal Arıtma	Elektrik akımıyla koagülasyon veya oksidatif parçalama	Kimyasal ilave gerektirmez; yüksek otomasyon uyumluluğu; çok yönlü ve güçlü mekanizma; geniş hacim ve yüksek yük toleransı; kesintisiz (sürekli) işletim potansiyeli: küçük/orta ölçekli tesisler için ideal çözüm	Yüksek enerji tüketimi; Yüksek ilk yatırım maliyeti; elektrot maliyeti (BDD) ; periyodik elektrot değişimi ve bakım ihtiyacı.; ölçek büyütmede güçlükler; Çıkış suyunda kalabilecek metal iyonlarının uzaklaştırılması için son arıtım gereksinimi
Koagülasyon / Flokülasyon	Yük nötralizasyonu ve flok oluşumu	Basit uygulama; düşük ilk yatırım maliyeti; yüksek partikül ve AKM(askıda katı maddeler) giderimi; geniş ticari ürün yelpazesi; organik yük azaltımı; iyi çökelme ve susuzlaştırma	Çözünmüş farmasötiklere karşı yetersiz; büyük hacimde toksik çamur üretir; tek başına kullanımda yetersiz; geri kazanımı olmayan ticari kimyasallara sürekli bağımlılık.; optimum verim için sürekli ve hassas pH izleme/ayarlama zorunluluğu.

Adsorpsiyon	Katı yüzey ile kirletici arasındaki fizikokimyasal etkileşim	Farmasötik mikrokirleticilerin ve inorganik ağır metallerin gideriminde üstün verimlilik; proses esnasında atık çamur (sludge) üretiminin olmaması veya minimum düzeyde kalması; geniş pH kararlılığı ve özelleştirilebilir (spesifik) kirletici tutma kabiliyeti; minimum bakım ihtiyacı; Düşük enerji tüketimi ve ekonomik işletme maliyeti; tasarım esnekliği; işletim basitliği; adsorbentlerin rejenere edilebilmesi (geri kazanım imkânı)	Doyma kapasitesi sınırlı; rejenere edilmezse ikincil atık oluşturur; etkili bir proses optimizasyonu ve kararlı bir süreç tasarımı geliştirmenin zorluğu; toz formdaki adsorbentlerin işlem sonunda sulu fazdan ayrıştırılması ve geri kazanım güçlüğü; Doygun adsorbentlerin geri dönüşümü ve desorpsiyon fazının yönetimiyle ilgili atık endişeleri.
-------------	---	--	---

(Khoo vd., 2022; Oulebsir vd., 2020; Zaied vd., 2020).

5. MATERYAL VE METOT

5.1. Amoksisilin Çözeltisi

Deneyisel çalışmalarında kullanılan ve adsorpsiyon yöntemi ile giderimi araştırılan Amoksisilin etken maddesi, Deva İlaç San. ve Tic. A.Ş. (Türkiye)'den temin edilmiştir. Amoksisilin'in 1000 mg/L (1000 ppm)'lik stok çözeltileri distile saf su kullanılarak günlük olarak hazırlanmıştır.

5.2. Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Kimyasal Maddeler

5.2.1. Amberlyst 15 adsorbenti ve hazırlanması

Tez çalışmalarında kullanılan adsorbentlerden biri olan Amberlyst 15 Merck firmasından temin edilmiştir. Amberlyst 15'in görünümü Şekil 5.1'de, ayrıntılı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Amberlyst 15'in görünümü

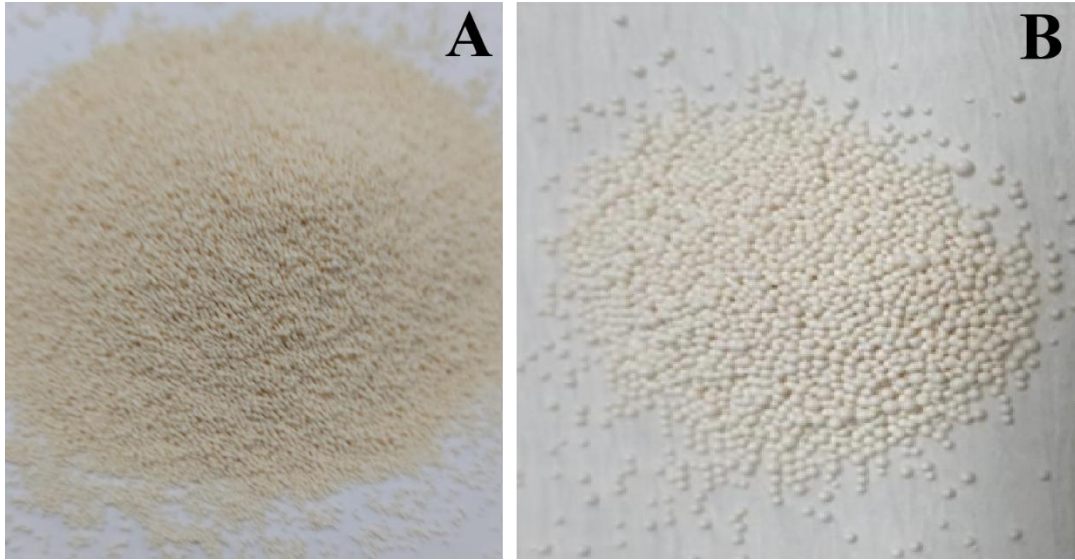
Çizelge 5.1. Amberlyst® 15 reçinesinin fiziksel, yapısal ve iyon değişim özellikleri

Reçine	Amberlyst® 15
Form	Boncuk (beads)
Buhar basıncı	17 mmHg (20 °C)
Çalışma sıcaklığı	Maksimum 120 °C
Nem	≤ %1,6
Kurutmada kayıp	110 °C'de kurutmada yaklaşık %5 kayıp
Polimer matrisi	Stiren-divinilbenzen (makroretiküler)
Fonksiyonel grup	Sülfonik asit fonksiyonel grubu
Parçacık boyutu	<300 µm
Çalışma pH aralığı	0–14
İyon değiştirme kapasitesi	1,7 meq/mL (ıslak yatak hacmi), 4,7 meq/g (kuru ağırlık)

Sigma-Aldrich. Aluminum (CAS No. 7429-90-5). Erişim tarihi: 24 Ağustos 2026. Sigma-Aldrich – Aluminum, CAS 7429-90-5

5.2.2. Amberlyst A21 adsorbenti ve hazırlanması

Deneysel çalışmalar kapsamında adsorbent olarak kullanılan bir diğer reçine Amberlyst A21'dir ve Sigma-Aldrich firmasından satın alınmıştır. Amberlyst A21'in görünümü Şekil 5.2'de, ayrıntılı fiziksel ve kimyasal özellikleri de Çizelge 5.2'de verilmektedir. Amberlyst A21'in nem içeriği genellikle %56–62 arasında değişmektedir. Bu nedenle deneysel çalışmalardan önce reçine 90 °C'de etüvde kurutulmuştur.



Şekil 5.2. Amberlyst A21'in kurutulmadan önceki (A) ve sonraki (B) görünümü

Çizelge 5.2. Amberlyst® A21 reçinesinin fiziksel, yapısal ve iyon değişim özellikleri

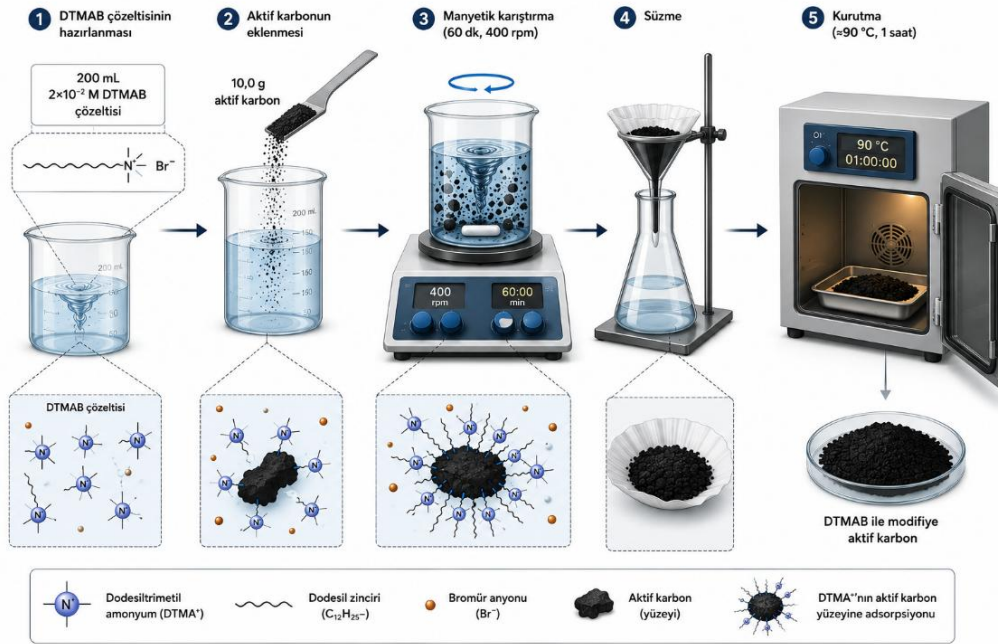
Reçine	Amberlyst® A21
Buhar basıncı	17 mmHg (20 °C)
Form	Boncuk (beads)
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	800 °F (≈ 426.7 °C)
Nem içeriği	%56–62
Polimer matrisi	Makrogözenekli (makroporöz) stiren-divinilbenzen
Fonksiyonel grup	Dimetilamino
Parçacık boyutu	22–30 mesh (490–690 μm)
İyon değiştirme kapasitesi	1,3 meq/mL (ıslak yatak hacmine göre)

Sigma-Aldrich. Aluminum (CAS No. 7429-90-5). Merck KGaA. Erişim 24 Ağustos 2026

5.2.3. Modifiye aktif karbon adsorbentleri ve hazırlanması

Deneyisel çalışmalarda kullanılacak olan modifiye aktif karbonların hazırlanması için aktif karbon (Darco type, 242233) ticari olarak Merck firmasından satın alınmıştır. 4-12 mesh aralığında tanecik boyutuna sahip ve granül yapısındadır. Modifikasyon prosesinden önce aktif karbon havanda dövülerek öğütülmüş ve tanecik boyutu küçültülmüştür.

Dodesiltrimetilamonyum bromür ile modifiye edilmiş aktif karbon (DTMAB-MAK)'un hazırlanması: Aktif karbonun dodesiltrimetil amonyum bromür (DTMAB) ile modifikasyonu için 200 mL 2×10^{-2} M DTMAB çözeltisi hazırlanmış ve bu çözeltiye 10,0 gram aktif karbon eklenerek manyetik karıştırıcıda 400 rpm hızında 60 dakika süresince karıştırılmıştır. Daha sonra süzülmüş ve 1 saat boyunca yaklaşık 90 °C'de etüvde kurutulmuştur.



Şekil 5.3. DTMAB-MAK adsorbentinin hazırlanması

5.2.4. Diğer kimyasallar ve çözeltiler

Adsorpsiyon çalışmalarında çözelti pH değerlerinin ayarlanması için kullanılan HCl ve NaOH, aktif karbonun modifikasyonu için kullanılan DTMAB Merck firmasından temin edilmiştir.

5.3. Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Cihazlar

5.3.1. Hassas terazi

Tez çalışması kapsamında tüm tartım işlemlerinde kullanılan hassas terazi 0,0001 duyarlılığa sahip Denver Instrument TP-214'tür (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Denver Instrument TP-214 hassas terazi

5.3.2. UV-Vis spektrometre

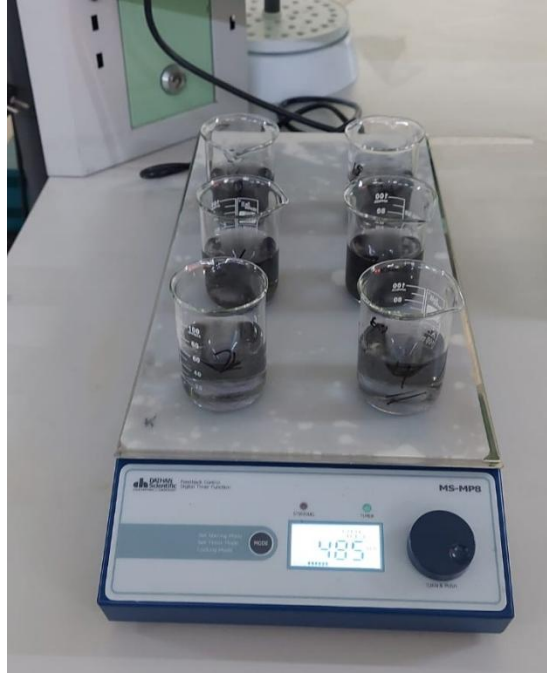
Adsorpsiyon prosesinden önce ve sonra sulu çözeltilerdeki Amoksisilin miktarının spektrofotometrik olarak ölçülmesinde T80 UV/VIS Spectrometer PG Instruments marka cihaz kullanılmıştır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. T80 UV/VIS Spectrometer PG Instrument marka spektrofotometre

5.3.3. Manyetik karıştırıcı

Adsorpsiyon deneylerinde çözeltilerin karıştırılması için Daihan Scientific MS-MP8 marka 8 noktalı çoklu manyetik karıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Daihan Scientific MS-MP8 marka manyetik karıştırıcı.

5.3.4. pH metre

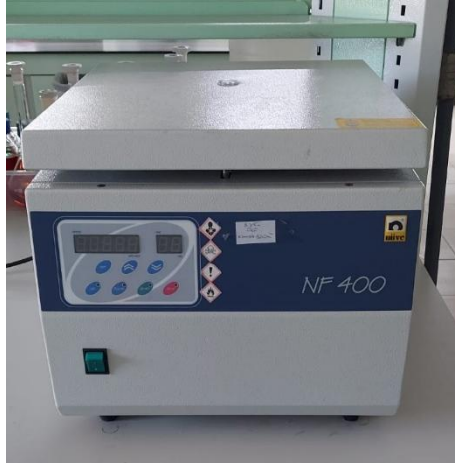
Metler Toledo Sevencompact model dijital pH metre (Şekil 5.7) kullanılarak çözeltilerin pH ayarlamaları ve ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.7. Metler Toledo Sevencompact model dijital pH metre

5.3.5. Santrifüj

Adsorpsiyon süreci sonunda sulu çözeltide bulunan adsorbentlerin spektrofotometrik ölçümden önce çöktürülmesi amacıyla Nüve NF 400 model santrifüj kullanılmıştır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Nüve NF 400 model santrifüj

5.3.6. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)

Deneyisel çalışmalarda kullanılan Amberlyst 15 ve Amberlyst A21 polimerik reçinelerinin Amoksisilin adsorpsiyonundan önce ve sonra elde edilen FTIR spektrumları Perkin Elmer (Spectrum 100 model) spektrofotometresi kullanılarak kaydedilmiştir (Şekil 5.9). Adsorbent yüzeyinde yer alan ve adsorpsiyondan sorumlu fonksiyonel gruplar ile kimyasal bağları tanımlamak amacıyla incelemeler yapılmıştır. Çalışmada tüm FTIR spektrumları ATR tekniği kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 5.9. Perkin Elmer (Spectrum 100) model FTIR cihazı

5.4. Adsorpsiyon Prosesi ve Optimum Deneysel Koşulların Belirlenmesi

Geniş spektrumlu β -laktam antibiyotiklerden biri olan Amoksisilin'in sulu çözeltilerden uzaklaştırılmasında ve geri kazanılmasında; polimerik reçinelerin ve modifiye aktif karbon türünün adsorbent olarak etkinliğinin araştırılması için kesikli adsorpsiyon prosesi kullanılmış ve deneyler çok noktalı bir manyetik karıştırıcı ile gerçekleştirilmiştir. Tüm adsorbentler için ilk basamakta pH'sı 2,0 ile 8,0 arasında değişen farklı pH çözeltileri kullanılarak adsorpsiyon verimine pH'nın etkisi araştırılmıştır. Ardından 10–150 dakika aralığında belirlenen sürelerde belirli hacimlerde örnekler alınarak dengeye gelme süresi belirlenmiştir. Adsorpsiyon prosesi için optimal pH ve dengeye gelme süresi belirlendikten sonra Amoksisilin'in giderimi üzerine adsorbent dozunun etkisi incelenmiş ve bu amaçla 0,25 g/L, 0,50 g/L, 1,00 g/L ve 2,00 g/L olacak şekilde adsorbent miktarı değiştirilmiştir.

Amoksisilin derişiminin etkisini incelemek için ise 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 mg/L olmak üzere farklı başlangıç derişimlerinde adsorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Amoksisilin'in adsorpsiyonu üzerine sıcaklığın etkisini incelemek amacı ile 298 K, 308 K ve 318 K'de adsorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar yardımı ile elde edilen veriler doğrultusunda adsorpsiyon izotermi oluşturulmuş, kinetik modellere uygunluk araştırılmış ve adsorpsiyonun termodinamik parametreleri hesaplanmıştır.

Adsorpsiyon deneyleri sonucu elde edilen veriler yardımı ile aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

$$\% \text{ Giderim} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (\text{F.5})$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (\text{F.6})$$

Giderim Yüzdesi (% G) ve q_e değerlerinin hesaplanması için kullanılan F.5 ve F.6 eşitliklerinde;

C_0 : Başlangıç Amoksisilin derişimini (mg/L)

C_e : Adsorpsiyon sürecinden sonra çözeltide kalan Amoksisilin derişimini (mg/L)

q_e : Adsorbentin birim kütlesi başına adsorplanan Amoksisilin miktarını (mg/g)

m : Adsorbentin miktarını (g)

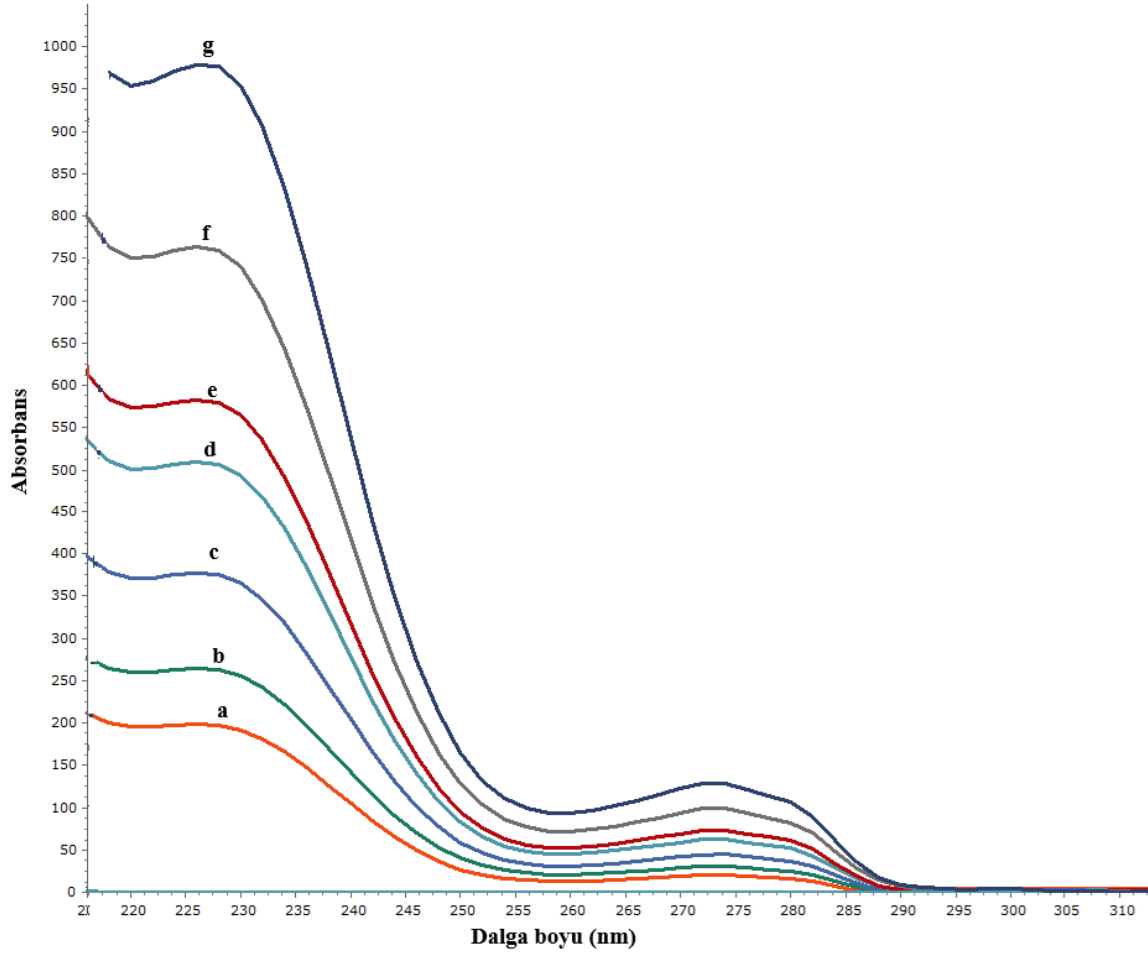
V : Çözelti hacmini (L) ifade etmektedir

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. UV-GB Spektroskopisi ile Amoksisilin Tayini

Uygulama kolaylığı ve yüksek maliyetli ekipman kullanımı gerektirmediği için spektrofotometrik yöntemler kalitatif ve kantitatif analizlerde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir.

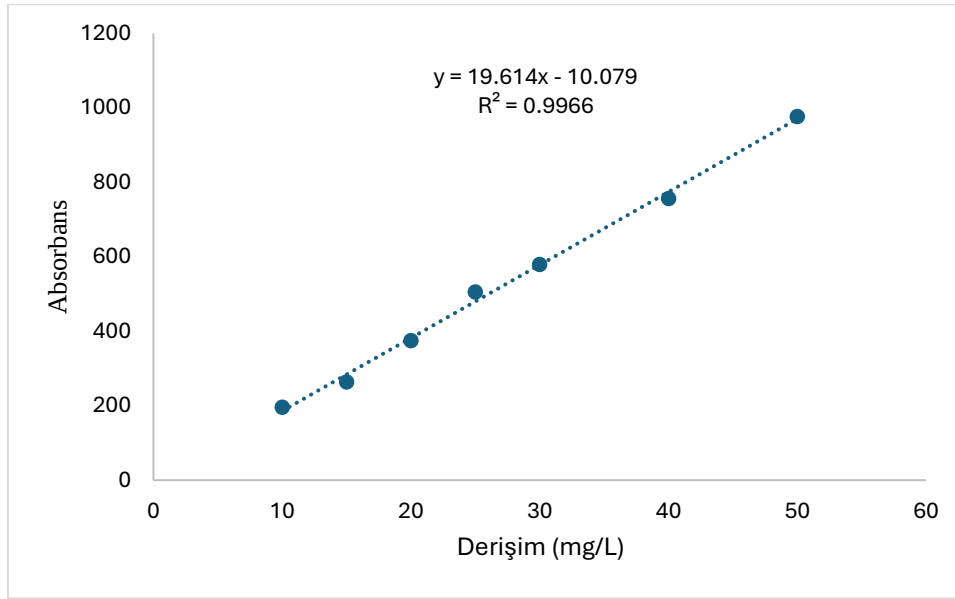
Amoksisilin molekülü, Şekil 6.1'den de görüldüğü üzere UV bölgede karakteristik absorpsiyon bantları vermektedir. Literatürde Amoksisilin'e ait maksimum absorpsiyon dalga boylarının (λ_{maks}) genellikle 190 ile 280 nm aralığında yer aldığı bildirilmektedir. Bu absorpsiyon bantları, Amoksisilin yapısında bulunan aromatik halka ve diğer kromofor gruplarından kaynaklanmaktadır. Amoksisilin'in kantitatif tayininde doğrudan UV spektrofotometrik yöntemlerin kullanımı da yaygındır. Düşük dalga boylarında çözücüler, yardımcı maddeler ve bazı örnek bileşenleri girişime neden olabilmekte ancak kuvars küvet kullanımı, uygun çözücü seçimi ve deneysel sürece bağlı olarak optimum analiz dalga boyunun belirlenmesi ile bu etkiler büyük ölçüde azaltılabilmektedir. Bu tez çalışmasında, Amoksisilin'in kalitatif ve kantitatif tayini herhangi bir türevlendirme veya renkli kompleks oluşturma basamağına ihtiyaç duyulmaksızın, doğrudan UV spektrofotometrik yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.1. Amoksisilin'in UV-GB absorpsiyon spektrumu ($C_{\text{Amoksisilin}}$: (a) 10, (b) 15, (c) 20, (d) 25, (e) 30, (f) 40, (g) 50 mg/L)

Amoksisilin'in tayini ve adsorpsiyon yoluyla giderimine ilişkin literatür çalışmaları incelendiğinde, UV-GB spektrofotometrisi kullanılarak doğrudan tayin edildiği çok sayıda çalışmanın bulunduğu görülmektedir (Belaissa vd., 2022; Şahin vd., 2024; Ochoa-Muñoz vd., 2025; Ullah vd., 2026; Zielinska et al., 2021; Mohammadi vd., 2015; Boukhelkhal vd., 2016).

Tez çalışması kapsamında ilk aşamada Amoksisilin'in UV-GB spektrumları farklı derişimlerde 190 ile 400 nm aralığında dalga boyu taraması yapılarak kaydedilmiştir. Bu amaçla, farklı derişimlerde (2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 ve 50 mg/L) standart Amoksisilin çözeltileri hazırlanmıştır. Şekil 6.1'den görüldüğü üzere, Amoksisilin yaklaşık 228 nm'de belirgin bir maksimum absorpsiyon bandı göstermektedir. Standart çözeltilerin 228 nm dalga boyundaki absorbans değerleri ölçülmüştür. Elde edilen absorbans değerleri Amoksisilin derişimine karşı grafiğe geçirilerek kalibrasyon grafiği oluşturulmuştur (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. Amoksisilin için elde edilen kalibrasyon grafiğı (λ_{maks} : 228 nm)

Farklı derişimlerde hazırlanan Amoksisilin standart çözeltilerinin UV-GB spektrumları incelendiğinde, 228 nm dalga boyunda gözlenen karakteristik absorpsiyon pik şiddetinin Amoksisilin derişiminin artışına bağılı olarak düzenli bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu dalga boyunda absorbans ile Amoksisilin derişimi arasında doğrusal bir ilişki elde edilmesi nedeniyle, adsorpsiyon çalışmaları öncesi ve sonrasında çözeltide bulunan Amoksisilin derişiminin belirlenmesi için analitik dalga boyu olarak 228 nm seçilmiş ve hesaplamalar elde edilen kalibrasyon denklemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

6.2. Amoksisilin Adsorpsiyonu Üzerine Çözelti pH'nın Etkisi

Adsorpsiyon süreçleri ile ilgili çalışmalarda çözeltinin başlangıç pH'ı adsorpsiyon verimini belirleyen en önemli deneysel parametreler arasında yer almaktadır. Adsorpsiyon sürecinin gerçekleştiğı ortam pH'ı, hem adsorbent yüzeyinin elektriksel yük özelliklerini hem de adsorbe edilecek adsorbatın iyonlaşma durumunu etkileyerek adsorpsiyon mekanizmasını doğrudan yönetmektedir. Sonuç olarak, adsorpsiyon sisteminin en uygun deneysel çalışma koşullarının belirlenebilmesi amacıyla çözelti başlangıç pH'ı etkisinin ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir. Bu bölümde, Amoksisilin'in adsorpsiyon yöntemi ile giderimi üzerine başlangıç pH'ı etkisi Amberlyst 15, Amberlyst A21 ve DTMAB-MAK olmak üzere üç farklı adsorbent kullanılarak ayrı ayrı değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

6.2.1 Amberlyst 15 ve Amberlyst A21 ile Amoksisilin adsorpsiyonu

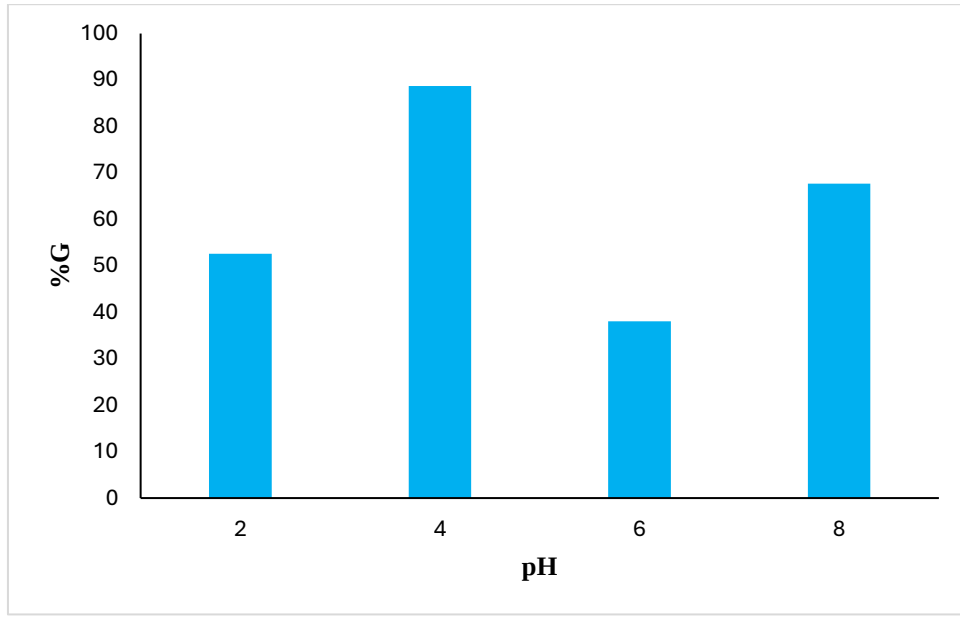
Endüstriyel, evsel ve sağlık kuruluşu kaynaklı ortaya çıkan atık sular, içerdği kirleticilerin türü ve miktarına bağlı olarak farklı pH değerlerine sahip olmakta ve bu nedenle de alıcı ortamlara farklı pH koşullarında deşarj edilmektedirler. Bu nedenle Amoksisilin giderimi üzerine pH etkisinin incelenmesi önemlidir.

Amoksisilin molekülünün Amberlyst 15 ve Amberlyst A21 ile adsorpsiyonunda başlangıç pH'nın etkisi aynı deneysel şartlar altında pH 2 ile pH 8 aralığında araştırılmıştır. Bunun temel nedeni, Amoksisilin'in alkali koşullarda hidroliz ve bozunmaya karşı daha duyarlı olmasıdır. Sun ve ark. (2023), Amoksisilin'in bazik ortamda herhangi bir harici katalizör veya enerji kaynağı bulunmaksızın da bozunabildiğini ve özellikle bazik koşullarda bozunma hızının arttığını bildirmiştir. Gerçekleştirdikleri çalışmada, Amoksisilin'in pH 9 ve üzerindeki koşullarda hidrolizinin hızlandığı, bu sürece çözülmüş oksijenin ve oluşan reaktif oksijen türlerinin katkı sağlayabildiği belirtilmiştir (Sun vd., 2023). Ayrıca literatürde yer alan diğer çalışmalar incelendiğinde pH 10 ve pH 11 için bildirilen yalancı birinci dereceden bozunma hız sabitlerinin sırasıyla 0,07995 h⁻¹ ve 0,103 h⁻¹ olduğu ifade edilmiştir (Hirte vd., 2016; Chadha vd., 2003). Bu nedenle daha yüksek pH değerlerinde ölçülen Amoksisilin derişimindeki azalmanın yalnızca adsorpsiyondan değil, aynı zamanda alkali ortamda gerçekleşebilecek kimyasal bozunmadan da kaynaklanma olasılığı bulunmaktadır. Adsorpsiyon ve bozunma etkilerinin birbirine karışmasını önlemek amacıyla bu çalışmada adsorpsiyon üzerine pH etkisi pH 2 ile pH 8 aralığında değerlendirilmiştir.

Amoksisilin başlangıç derişimi 50 mg/L, adsorbent miktarı 0,1 g ve çözelti hacmi 50 mL olarak alınmış, 150 rpm karıştırma hızında deneyler gerçekleştirilmiştir. Çözelti pH'sının giderim yüzdeleri ve adsorpsiyon kapasiteleri üzerine etkisini gösteren sonuçlar Çizelge 6.1 ve 6.2 ile Şekil 6.3 ve 6.4'de sunulmaktadır.

Çizelge 6.1. Amoksisilin'in Amberlyst A21 yüzeyine adsorpsiyonunda çözelti pH'nın giderim yüzdeleri ve adsorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi. (C_{Amoksisilin}: 50 mg/L, t: 60 dakika)

pH	2	4	6	8
% G	52,59	88,70	38,04	67,71
qe (mg/g)	13,15	22,18	9,51	16,93

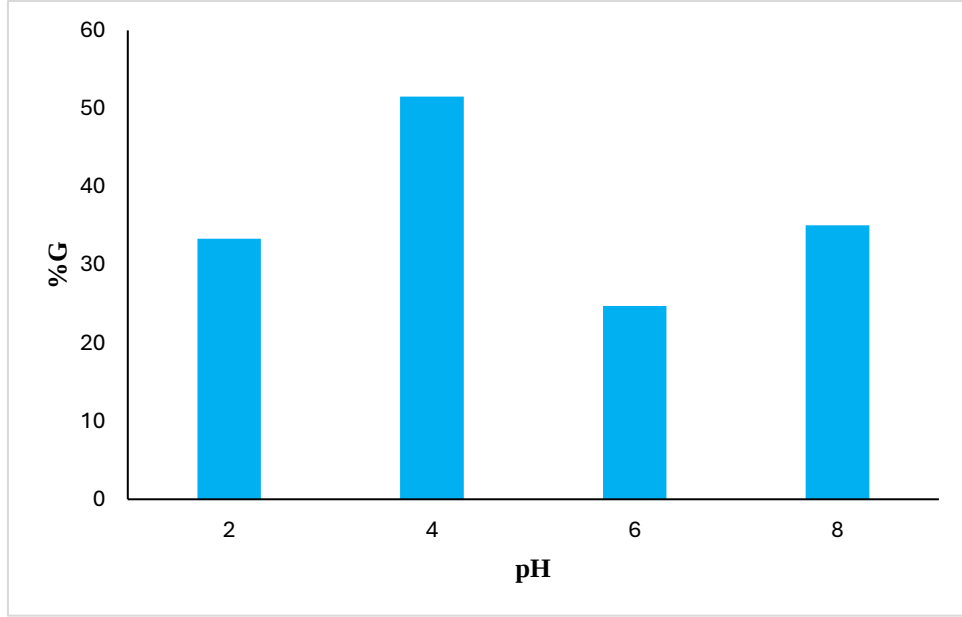


Şekil 6.3. Amoksisilin'in Amberlyst A21 yüzeyine adsorpsiyonunda çözelti pH'nın giderim yüzdesi üzerine etkisi. ($C_{\text{Amoksisilin}}$: 50 mg/L; t: 60 dakika)

Amberlyst A21 adsorbentinin kullanıldığı çalışmalar ile ilgili Çizelge 6.1 incelendiğinde, elde edilen verilere göre, çözelti pH'nın Amoksisilin adsorpsiyonu üzerinde belirgin bir etkisi vardır. pH 2'de %52,59 olan giderim yüzdesi, çözelti pH'ı 4'e yükseldiğinde önemli ölçüde artarak %88,70'e ulaşmış ve incelenen pH değerleri arasında en yüksek giderim pH 4'te elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, pH 2'de 13,15 mg/g olarak hesaplanan denge adsorpsiyon kapasitesi (q_e), pH 4'te 22,18 mg/g'a yükselerek maksimum değerine ulaşmıştır. Bu sonuçlara göre, Amberlyst A21 ile Amoksisilin adsorpsiyonu açısından en uygun ortamın pH 4 olduğu söylenebilir. Çözelti pH'ının 6'ya yükselmesiyle Amoksisilin gideriminde belirgin bir azalma ortaya çıkmış ve giderim yüzdesi %38,04'e, q_e değeri ise 9,51 mg/g'a düşmüştür. pH 8'de ise adsorpsiyon performansının yeniden arttığı gözlenmiştir; giderim yüzdesi %67,71'e ve q_e değeri 16,93 mg/g'a ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, Amberlyst A21 ile Amoksisilin giderimi için incelenen deneysel koşullar arasında optimum pH değeri 4 olarak seçilmiştir.

Çizelge 6.2. Amoksisilin'in Amberlyst 15 yüzeyine adsorpsiyonunda çözelti pH'nın giderim yüzdeleri ve adsorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi. ($C_{\text{Amoksisilin}}$: 50 mg/L, t: 30 dakika)

pH	2	4	6	8
% G	33,34	51,54	24,72	35,06
q_e (mg/g)	8,34	12,89	6,18	8,77



Şekil 6.4. Amoksisilin'in Amberlyst 15 yüzeyine adsorpsiyonunda çözelti pH'nın giderim yüzdesi üzerine etkisi. ($C_{\text{Amoksisilin}}$: 50 mg/L, t:30 dakika)

Adsorpsiyon ortamı pH'ının Amoksisilin'in Amberlyst 15 ile adsorpsiyonu üzerindeki etkisi pH 2–8 aralığında incelendiğinde, giderim yüzdesinin ve adsorpsiyon kapasitesinin çözelti pH'ına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği görülmüştür. pH 2'de %33,34 olarak belirlenen Amoksisilin giderimi, pH'ın 4'e yükseltilmesiyle belirgin bir artış göstererek %51,54'ye ulaşmıştır. Benzer şekilde, q_e değeri de 8,34 mg/g'dan 12,89 mg/g'a yükselmiştir. İncelenen pH değerleri arasında hem en yüksek giderim yüzdesinin hem de en yüksek adsorpsiyon kapasitesinin pH 4'te elde edilmesi, Amberlyst 15'in adsorbent olarak kullanıldığı çalışmalarda adsorpsiyon açısından en uygun pH değerinin 4 olduğunu göstermektedir.

6.2.2. Modifiye aktif karbon ile Amoksisilin adsorpsiyonu

Amoksisilin'in adsorpsiyon prosesi ile gideriminde aktif karbonun ve yüzey modifikasyonunun etkisini değerlendirmek amacıyla Amoksisilin giderimi aktif karbon ve DTMAB-MAK materyalleri ile incelenmiştir. İlk basamakta modifiye edilmemiş aktif karbon kullanılarak farklı pH koşullarında adsorpsiyon çalışmaları yapılmış ve bu kapsamda pH 2 ile 8 aralığında Amoksisilin giderim performansı incelenmiştir.

Çizelge 6.3. Amoksisilin'in aktif karbon yüzeyine adsorpsiyonunda çözelti pH'nın giderim yüzdeleri ve adsorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi. ($C_{\text{Amoksisilin}}$: 50 mg/L, t: 45 dakika)

pH	2	4	6	8
% G	32,04	44,06	51,17	53,68
qe (mg/g)	8,01	11,02	12,79	13,42

Çizelge 6.3 incelendiğinde, çözelti pH'ının artmasıyla birlikte aktif karbonun Amoksisilin giderim performansının düzenli bir şekilde arttığı görülmektedir. pH 2'de %32,04 olan giderim yüzdesi, pH 8'de %53,68'e yükselmiştir. Benzer şekilde adsorpsiyon kapasitesi de pH artışıyla birlikte 8,01 mg/g'dan 13,42 mg/g'a artmıştır. İncelenen deneysel şartlar altında hem en yüksek giderim yüzdesi hem de en yüksek adsorpsiyon kapasitesi pH 8'de elde edilmiştir.

Aktif karbon grubu ile gerçekleştirilen çalışmanın devamında aktif karbonun adsorpsiyon özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla hazırlanan modifiye DTMA-B-MAK adsorbenti kullanılmış, aynı pH skalasında deneyler tekrarlanmış ve yüzey modifikasyonunun Amoksisilin'in giderimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. DTMA-B-MAK adsorbenti için elde edilen sonuçlar Çizelge 6.4'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

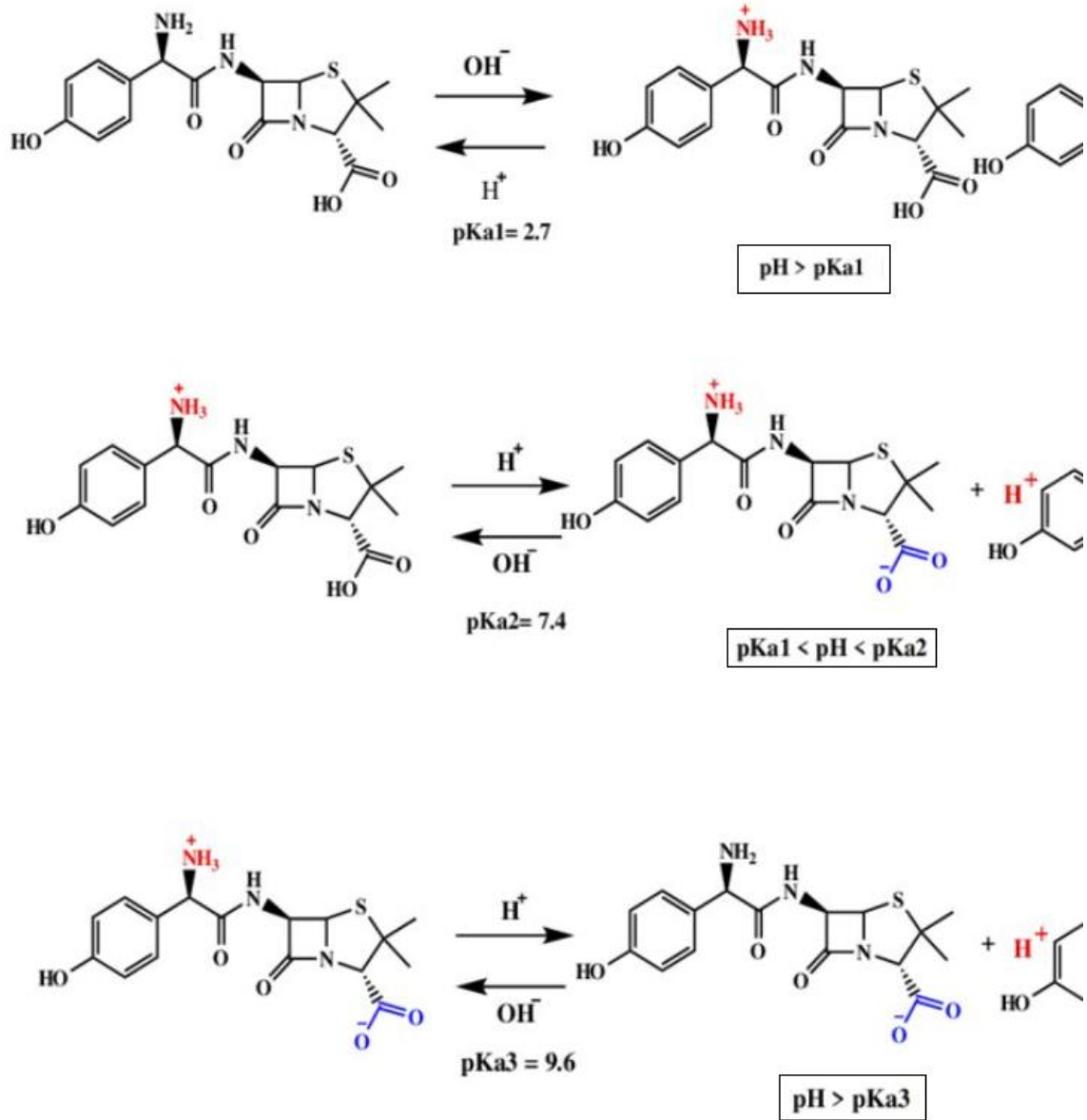
Çizelge 6.4. Amoksisilin'in adsorpsiyonunda aktif karbon adsorbent türünün ve çözelti pH'nın giderim yüzdeleri üzerine etkisi. ($C_{\text{Amoksisilin}}$: 50 mg/L, t: 45 dakika)

pH	2	4	6	8
Adsorbent türü				
Aktif karbon	32,04	44,06	51,17	53,68
DTMA-B-MAK	37,00	51,27	58,60	62,33

Çizelge 6.4. incelendiğinde modifikasyon sonucunda sağlanan artışın sınırlı düzeyde kalması ve Amoksisilin giderim performansının çok fazla değişmemesi nedeniyle, çalışmanın sonraki aşamalarında DTMA-B-MAK ile deneylere devam edilmemiştir. Bu doğrultuda, sonraki optimizasyon, adsorpsiyon çalışmaları, izoterm ve kinetik incelemeleri kısa bir temas süresinde daha yüksek giderim performansı gösteren Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 reçineleri kullanılarak sürdürülmüştür.

6.2.3. Ortam pH'ının adsorpsiyon mekanizması üzerindeki etkisi

Adsorpsiyon süreci ve kapasitesi ile çözelti pH'ı arasında önemli bir ilişki vardır. Bu süreç Amoksisilin'in ayrışma sabitleri (pK_a) ve adsorbent olarak kullanılan Amberlyst A21 ile Amberlyst 15'in yüzeyinde yer alan fonksiyonel grupların yükü ile doğrudan ilişkili bir şekilde açıklanabilir. Amoksisilin, fenol, amino ve karboksil gruplarıyla ilişkili bir β -laktam halkası içeren moleküldür. Bu üç fonksiyonel grup, farklı pH koşulları altında deprotonasyon ve protonasyona eğilimlidir. Karboksil grubu pH 2,68'de (pK_{a1}), amino grubu pH 7,49'da (pK_{a2}) ve fenol grubu pH 9,63'te (pK_{a3}) deprotonize olur (Souza vd., 2023). Dolayısı ile Amoksisilin'in yüzey yükleri pH ile değişir (Şekil 6.5); pH $<pK_{a1}$ ($=2,4$) için Amoksisilin molekülü $-COOH/-NH_3^+/-OH$ (Amoksisilin⁺) olarak protonlanır. Tersine, ($pK_{a1} < pH < pK_{a2} = 7,4$) için karboksilik grup protonsuz hale gelir $-COO^-/-NH_3^+/-OH$ (Amoksisilin $\pm$) iken pK_{a2} ($7,4$) $< pH < pK_{a3}$ ($9,6$) aralığında hem karboksilik hem de amin grupları protonsuz hale gelir $-COO^-/-NH_2/-OH$ (Amoksisilin⁻). pH $>pK_{a3}$ ($9,6$) için fenolik hidroksil de protondan arındırılır ve sonuçta $-COO^-/-NH_2/-O^-$ olarak gösterilebilecek- 2 yüke sahip Amoksisilin oluşur (Laksaci vd., 2023).



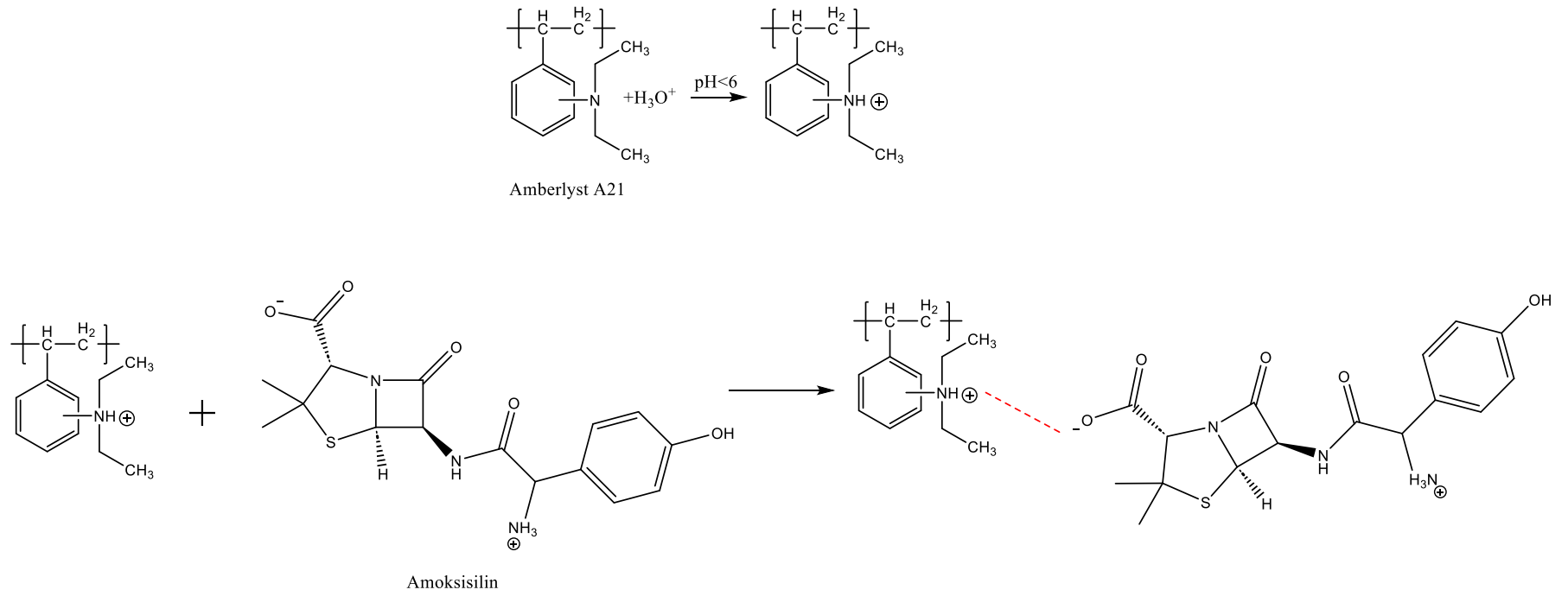
Şekil 6.5. Farklı pKa değerlerinde Amoksisilin'in iyonize formları

Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 yüzeyinde en yüksek giderimin pH 4'te gerçekleştiği görülmektedir. Amoksisilin'in pKa değerleri dikkate alındığında, pH 4'te karboksilik asit grubunun büyük ölçüde deprotonlanarak COO^- , amino grubunun ise protonlanmış NH_3^+ formunda bulunduğu ve dolayısıyla Amoksisilin'in bu pH'da ağırlıklı olarak zwitteriyonik halde olduğu söylenebilir.

Sıfır yük noktası (Zero Point Charge, PZC), bir adsorbent yüzeyindeki toplam pozitif ve negatif yüklerin birbirini dengelediği ve yüzeyin net elektriksel yükünün sıfır olduğu pH değerini ifade eder. PZC değeri genellikle pH_{PZC} ile ifade edilir ve adsorpsiyon proseslerinde adsorbent

yüzeyinin yük özelliklerinin değerlendirilmesi açısından önemli bir deneysel parametredir. Çözelti pH'nın pH_{PZC} değerinden düşük olduğu koşullarda adsorbent yüzeyi genellikle pozitif yük taşıırken, pH'ın pH_{PZC} değerinden yüksek olması durumunda ise yüzey negatif yük taşır. Çözelti pH'nın pH_{PZC} değerine eşit olduğu durumda ise yüzeyin net elektriksel yükü yaklaşık olarak sıfır kabul edilmektedir. Bu nedenle pH_{PZC} , özellikle iyonlaşabilen adsorbat moleküllerinin adsorpsiyonunda adsorbent ve adsorbat molekülü arasındaki elektrostatik çekim ve itme etkileşimlerinin açıklanmasında yaygın olarak kullanılan önemli bir parametredir.

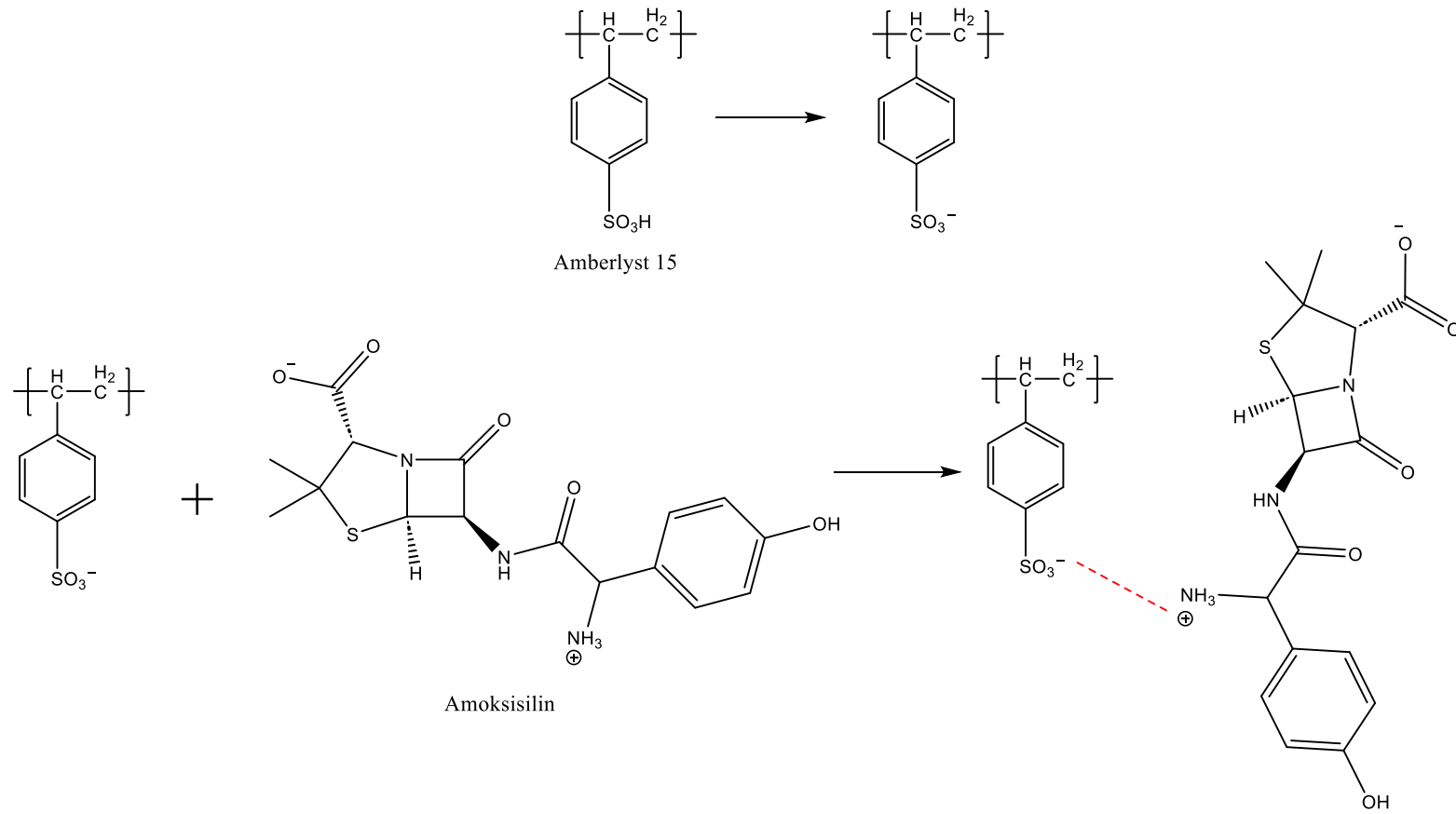
Wawrzkieicz ve Kucharczyk 2023 yılında yaptıkları bir çalışmada Amberlyst A21 polimerik reçinesinin pH_{PZC} değerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada Amberlyst A21 reçinesi için ölçülen pH_{PZC} değeri 6,01 olarak bulunmuştur. Dolayısı ile pH değeri pH_{PZC} 'den yani 6,01'den düşük olduğunda Amberlyst A21 pozitif yüklüdür, pH değeri pH_{PZC} değerinden yüksek olduğunda ise Amberlyst A21 yüzeyi negatif yüklüdür (Wawrzkieicz ve Kucharczyk, 2023). Amoksisilin ile Amberlyst A21 arasındaki olası adsorpsiyon etkileşim mekanizmasının şematik gösterimi Şekil 6.6'da verilmektedir.



Şekil 6.6. Amoksisilin ile Amberlyst A21 arasındaki olası adsorpsiyon etkileşim mekanizmasının şematik gösterimi

pH 4 koşullarında elektrostatik etkileşimler açısından değerlendirildiğinde hem Amoksisilin'in iyonlaşma durumu hem de Amberlyst A21'in yüzeyindeki fonksiyonel grupların protonlanma durumu adsorpsiyon mekanizmasının aydınlatılması açısından önem taşımaktadır. Amberlyst A21 yapısında zayıf bazik tersiyer amin fonksiyonel grupları bulunduran bir anyon değiştirici polimerik reçinedir. Asidik ortamda Amberlyst A21'in amin grupları protonlanarak pozitif yüklü tersiyer amin merkezlerine (R_3NH^+) dönüşebilmektedir (Şekil 6.6). Bu nedenle çözelti pH'ı 4 olduğunda Amberlyst A21 üzerindeki protonlanmış amin grupları, negatif yüklü moleküllerin/iyonların tutunmasına uygun elektrostatik etkileşim merkezleri ortaya çıkarabilmektedir. Amoksisilin molekülünün pKa değerleri yaklaşık olarak 2,4; 7,4 ve 9,6 olarak bilinmektedir. Dolayısıyla Şekil 6.5 incelendiğinde deneysel çalışmanın yürütüldüğü pH 4,0'te karboksil grubu büyük ölçüde deprotonlanmış $-COO^-$ formunda bulunurken amino grubu protonlanmış $-NH_3^+$ formunu korumaktadır. Deneysel çalışma koşullarında Amberlyst A21'in protonlanmış tersiyer amin grupları (R_3NH^+) ile Amoksisilin'in deprotonlanmış karboksilat grubu ($-COO^-$) arasında elektrostatik çekim meydana gelmesi mümkündür. Ayrıca, Amberlyst A21'in bir anyon değiştirici reçine olması da bu etkileşim ve adsorpsiyon mekanizmasını desteklemektedir; zayıf bazik anyon değiştirici reçinelerin yapısında bulunan amin grupları protonlanarak anyonik türlerin tutulmasını sağlayabilmektedir.

Amberlyst 15 ise güçlü asidik karaktere sahip olan sülfonik asit grupları içeren bir katyon değiştirici reçinedir ve pH 4 koşullarında iyon değişim bölgeleri büyük ölçüde negatif yüke sahip $-SO_3^-$ formunda bulunur (Şekil 6.7). Yukarıda bahsedildiği şekilde, pH 4 ortamında Amoksisilin'in yapısı göz önüne alındığında; Amberlyst 15'in negatif yüklü $-SO_3^-$ grupları ile zwitter iyonik Amoksisilin molekülünün pozitif yüklü $-NH_3^+$ grupları arasında meydana gelebilecek elektrostatik çekim ve iyon değişim etkileşimlerinin Amoksisilin adsorpsiyonuna ve giderimine katkıda bulunduğu söylenebilir. Bununla birlikte, Amberlyst 15'in makroretiküler stiren-divinilbenzen matriksi ile Amoksisilin molekülü arasında gerçekleşebilecek elektrostatik olmayan etkileşimlerin de giderim sürecine katkı sağlayabileceği değerlendirilebilir. Bu makroretiküler yapı Amberlyst 15'e adsorbat moleküllerinin girebileceği gözenekler sağlar. Bu gözenekli yapı sayesinde Amoksisilin molekülleri yalnızca reçinenin dış yüzeyindeki aktif gruplarla değil, gözeneklere difüze olarak reçinenin iç bölgelerindeki $-SO_3^-$ gruplarıyla da etkileşime girebilir.



Şekil 6.7. Amoksisilin ile Amberlyst 15 arasındaki olası adsorpsiyon etkileşim mekanizmasının şematik gösterimi

Pinherio ve arkadaşları 2024 yılında yaptıkları bir çalışmada aljinat biopolimer kompozit boncukları kullanarak Amoksisilin'in adsorpsiyon yöntemi ile giderimini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada adsorpsiyon için en uygun çözelti pH'ı 4 olarak bulunmuştur ve bu durum aljinatın karboksil grubunun varlığı nedeniyle pH 3'ün üzerindeki çözelti pH değerlerinde negatif bir yüke sahip olması ile açıklanmıştır. Aljinattaki negatif yüklü karboksil grubu ve Amoksisilin'deki pozitif yüklü amino grubu arasında elektrostatik etkileşimin adsorpsiyondan sorumlu olabileceği belirtilmiştir (Pinherio vd., 2024).

Çözelti pH'nın adsorpsiyon üzerine etkisi pH 2 ile 8 arasında araştırılmıştır. **Bölüm 6.2.1**'de bahsedilen Amoksisilin'in yüksek alkali pH değerlerinde hidroliz olabilme etkisinin yanı sıra adsorpsiyon giderimini sınırlayan bir diğer hususta şu şekilde açıklanabilir; Literatür çalışmaları göstermektedir ki, çözelti pH'ı yaklaşık olarak 9'dan büyük olduğunda, Amoksisilin proton kaybederek -2 yüklü Amoksisilin iyonuna dönüşür. Yüksek bazikliğe sahip çözeltilerde özellikle Amberlyst A21 yüzeyi negatiftir. Bu ortamda adsorbent ve adsorbat yüzeyinde yer alan negatif yüklerin birbirini itmesi adsorpsiyon sürecini olumsuz etkiler ve giderim yüzdesi değerlerinin daha düşük çıkması beklenir. Ayrıca yüksek pH değerlerinde ortamda yüksek miktarda bulunan OH⁻ iyonları ile -2 yüklü Amoksisilin iyonları arasında adsorpsiyon açısından bir rekabet gerçekleşecektir. Her iki durumda adsorpsiyon kapasitesinde ciddi bir düşüşe neden olur.

6.3. Temas Süresinin Amoksisilin Adsorpsiyonu Üzerine Etkisi

Temas süresi adsorpsiyon sürecinin dengeye ulaşması için gerekli zamanı ortaya koymakta ve bu nedenle adsorpsiyon kinetiği hakkında da önemli bilgiler sunmaktadır. Adsorpsiyon prosesini tasarlamak ve deneysel süreci optimize etmek için, belirli bir temas (dengeye gelme) süresinden sonra adsorbent tarafından tutulan adsorbat miktarını belirlemek ve sistemdeki etkileşimleri ortaya koymak önemlidir (Wawrzkievicz ve Kucharczyk, 2023). Ayrıca, farklı türdeki kirleticilerin hızlı bir şekilde ortamdan giderilmesi ve kısa bir sürede dengenin kurulması atık su arıtımın süreçlerinde kullanılan adsorpsiyon verimliliğinin önemli bir göstergesidir. Bu amaçla temas süresinin etkisi Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 polimerik reçineleri için detaylı olarak araştırılmıştır. Çalışmalar 50 mg/L başlangıç derişime sahip 50 mL Amoksisilin çözeltilerinde, en yüksek giderim yüzdesinin elde edildiği pH 4'te, 150 rpm karıştırma hızında, 2,0 g/L adsorbent miktarı koşullarına gerçekleştirilmiştir. En uygun temas süresinin belirlenmesi için 0 ile 90. dakikalar arasında belirli zaman sürelerinde Amoksisilin örnekleri alınmış ve spektrofotometrik olarak ölçümü yapılmıştır. Temas süresinin etkisini gösteren sonuçlar Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.5. Amoksisilin'in Amberlyst A21 ile adsorpsiyonunda temas süresinin etkisi.

(C_{Amoksisilin}: 50 mg/L)

Temas süresi (dk)	10	20	30	40	50	60
%G	55,01	57,89	63,02	69,76	77,69	88,70

Çizelge 6.5 incelendiğinde Amoksisilin için giderim yüzdesi ilk 10 dakikalık temas süresinde hızlı bir şekilde artmış daha sonra ise 60. dakikaya kadar daha yavaş bir şekilde ilerlemiştir. Gerçekleştirilen tez çalışmasında Amberlyst A21'in adsorbent olarak kullanıldığı çalışmada Amoksisilin adsorpsiyonu için en yüksek giderim değeri 60. dakikada %88,70 olarak hesaplanmıştır. Amoksisilin'in Amberlyst A21 ile adsorpsiyonu için temas süresi 60 dakika olarak belirlenmiş ve tez çalışmasının izoterm ve kinetik incelemeleri için bu değer kullanılmıştır. Daha uzun temas sürelerinde yüzde giderim ve adsorpsiyon kapasitesi değerlerinde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir.

Çizelge 6.6. Amoksisilin'in Amberlyst 15 ile adsorpsiyonunda temas süresinin etkisi.

(C_{Amoksisilin}: 50 mg/L)

Temas süresi (dk)	10	20	30	40	50	60	75
%G	23,48	44,24	51,54	60,14	67,79	71,56	82,53

Amoksisilin'in Amberlyst 15 yüzeyine adsorpsiyonunda dengeye gelme süresinin giderim yüzdesi üzerindeki etkisi Çizelge 6.6'da verilmektedir. Temas süresinin artmasıyla birlikte Amoksisilin gideriminin düzenli olarak arttığı görülmektedir. İlk 10 dakikada %23,48 olan giderim yüzdesi, 30. dakikada %51,54'e ve 60. dakikada %71,56'ya ulaşmış, 75 dakikalık temas süresi sonunda ise en yüksek değer olan %82,53 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, temas süresinin artmasının Amoksisilin moleküllerinin Amberlyst 15 yüzeyindeki aktif bölgelere adsorpsiyonunu artırdığını göstermektedir. Tez çalışmasının devam eden basamaklarında Amberlyst 15'in kullanıldığı tüm çalışmalarda temas süresi 75 dakika olarak kullanılmıştır.

Her iki adsorbent ile gerçekleştirilen deneylerde ilk 10 dakika içerisindeki giderim yüzdeleri oldukça yüksektir ve Amberlyst A21 için %55,01; Amberlyst 15 için ise %23,48'tür. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; çözelti ve adsorbent yüzeyi arasındaki güçlü derişim gradyanı kütle transferini teşvik eder ve adsorbent yüzeyindeki çok sayıda boş aktif bölge ilk aşamada görülen hızlı adsorpsiyondan sorumludur. Dengeye gelme süresi arttıkça mevcut adsorpsiyon bölgeleri kademeli olarak dolmaya başlar ve denge sağlanana kadar adsorpsiyon hızı yavaşlar (Bahr vd.,

2026). Sonuç olarak adsorpsiyonun başlangıç basamağında adsorbent yüzeyinde çok sayıda aktif bağlayıcı birimin bulunması zaman geçtikten sonra ise katı yüzeyi üzerindeki moleküller arası itme kuvvetlerinden dolayı serbest bağlayıcı birimlere kolaylıkla ulaşılmasından kaynaklanabilir (Nadaroğlu, vd., 2017).

6.4. Adsorbent Miktarının Amoksisilin Adsorpsiyonu Üzerine Etkisi

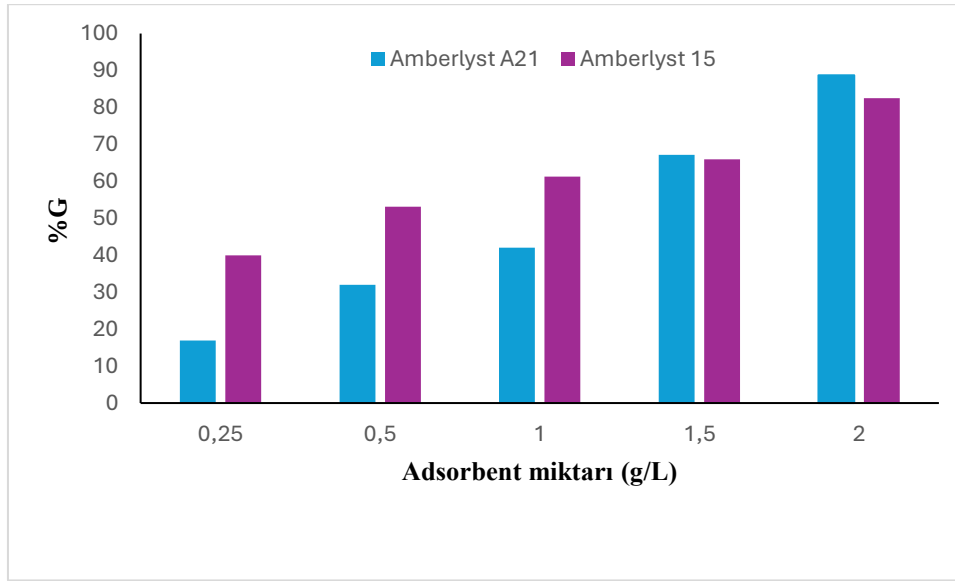
Adsorbat molekülünün adsorpsiyon sürecinde katı adsorbent yüzeyinde bulunan bir dizi aktif bölgeye bağlanması nedeniyle, adsorbent dozunun adsorbent-adsorbat etkileşiminin etkinliğini belirlemede çok önemli bir faktör olduğu bilinmektedir (Elnazer vd., 2024).

Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 kullanılarak sulu çözelti ortamından Amoksisilin etken maddesinin giderimi üzerine pH etkisi ve temas süresi sırası ile pH 4, 60 dakika ve pH 4, 75 dakika olarak belirlendikten sonra 25 °C sıcaklıkta 50 mg/L başlangıç Amoksisilin derişiminde adsorbent miktarları 0,25 g/L, 0,50 g/L, 1,00 g/L, 1,50 g/L ve 2,00 g/L olarak değiştirilerek Amoksisilin giderimine etkisi araştırılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.7'te verilmiştir.

Çizelge 6.7. Amoksisilin'in giderim yüzdeleri üzerine Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 miktarının etkisi. ($C_{\text{Amoksisilin}}$: 50 mg/L)

Adsorbent Miktarı	Amberlyst A21	Amberlyst 15
0,25 g/L	%16,89	%40,01
0,5 g/L	%32,00	%53,17
1,00 g/L	%42,04	%61,28
1,50 g/L	%67,16	%65,97
2,00 g/L	%88,70	%82,53

Adsorbent miktarı adsorpsiyon sürecini etkileyen en önemli deneysel şartlardan biridir ve belirli bir adsorbat derişimi varlığında adsorbent yüzeyindeki bağlayıcı sitelerin sayısı ile ilişkili olarak adsorbentin potansiyelini açıklamaya yardımcı olur (Kumar, vd., 2016). Çizelge 6.7 ve Şekil 6.8'den de görüldüğü üzere farklı adsorbent miktarları araştırıldığında hem Amberlyst A21 hem de Amberlyst 15 için adsorbent miktarının artması ile birlikte giderim yüzdeleri değerlerinde belirgin artışlar elde edilmiştir. Amberlyst A21 miktarı 0,25 g/L'den 2,00 g/L'ye çıkarıldığında giderim yüzdesi %16,89'dan %88,70'e yükselirken, Amberlyst 15 için aynı deneysel koşullarda %40,01'den %82,53'e yükselmiştir. Ayrıca düşük adsorbent miktarlarında Amberlyst 15'in daha yüksek giderim sağladığı, 2,00 g/L adsorbent miktarında ise Amberlyst A21'in giderim yüzdesinin Amberlyst 15'i geçtiği söylenebilir.



Şekil 6.8. Amoksisilin'in giderim yüzdesi üzerine Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 miktarının etkisi ($C_{\text{Amoksisilin}}$: 50 mg/L).

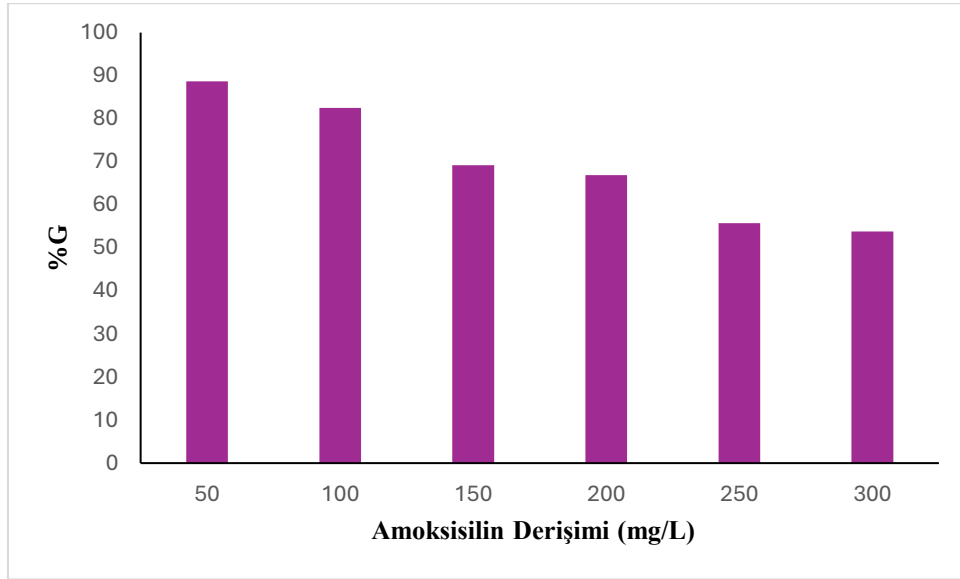
Ancak adsorbent miktarı olarak 2,0 g/L üzerinde değerler kullanıldığında giderim yüzdeleri açısından önemli bir değişiklik olmamıştır. Daha yüksek adsorbent miktarı varlığında giderim yüzdesi değerlerinin artmaması, değişmemesi veya azalması ise yüksek adsorbent derişiminin etkin adsorpsiyon alanını azaltması ile açıklanabilir. Çünkü yüksek adsorbent derişimlerinde adsorpsiyon birimlerinin üst üste örtüşmesi ve aktif bağlayıcı birimlerin azalması olasılığı ortaya çıkabilir (Kumar, vd., 2016; Nguyen, vd., 2013).

6.5. Amoksisilin Başlangıç Derişiminin Adsorpsiyon Üzerine Etkisi

Başlangıç Amoksisilin derişiminin adsorpsiyon üzerine etkisinin incelendiği deneyler hem Amberlyst A21 hem de Amberlyst 15 polimerik reçineleri için ayrı ayrı gerçekleştirildi. 0,1 g adsorbent, farklı başlangıç derişimlerine sahip 50 mL Amoksisilin çözeltisine eklenerek belirlenen temas süreleri boyunca 150 rpm karıştırma hızında karıştırıldı. Amoksisilin başlangıç derişimleri 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 mg/L olacak şekilde araştırıldı. Amoksisilin'in başlangıç derişimlerinin adsorpsiyon giderim yüzdeleri ve adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkisi Amberlyst A21 için Çizelge 6.8 ve Şekil 6.9 Amberlyst 15 için ise Çizelge 6.9 ve Şekil 6.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.8. Amoksisilin'in Amberlyst A21 yüzeyine adsorpsiyonunda başlangıç derişiminin giderim yüzdesi ve adsorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi. (pH:4)

Amoksisilin derişimi (mg/L)	50	100	150	200	250	300
%G	88,70	82,51	69,20	66,88	55,71	53,77
qe (mg/g)	22,18	41,26	51,90	66,88	69,64	80,66

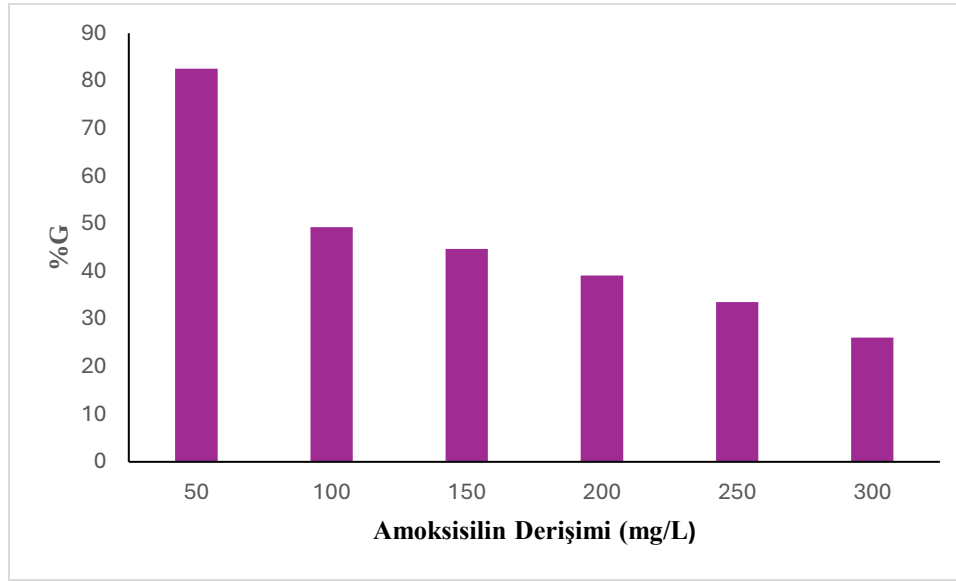


Şekil 6.9. Amoksisilin'in Amberlyst A21 yüzeyine adsorpsiyonunda başlangıç derişiminin giderim yüzdesi üzerine etkisi

Amoksisilin başlangıç konsantrasyonunun Amberlyst A21 polimerik reçinesi ile adsorpsiyonu üzerine etkisi Çizelge 6.8'de verilmiştir. Başlangıç derişiminin 50 mg/L'den 300 mg/L'ye artırılmasıyla giderim yüzdesinin genel olarak azaldığı, buna karşılık adsorpsiyon kapasitesinin (q_e) arttığı görülmektedir. En yüksek giderim %88,70 ile 50 mg/L başlangıç derişiminde elde edilirken, bu değer 300 mg/L'de %53,77 değerine azalmıştır. Buna karşılık q_e değeri 22,18 mg/g'dan 80,66 mg/g'a yükselmiştir.

Çizelge 6.9. Amoksisilin'in Amberlyst 15 yüzeyine adsorpsiyonunda başlangıç derişiminin giderim yüzdesi ve adsorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi. (pH:4)

Amoksisilin derişimi (mg/L)	50	100	150	200	250	300
%G	82,53	49,31	44,69	39,13	33,56	26,10
qe (mg/g)	20,63	24,65	33,51	39,13	41,95	39,16



Şekil 6.10. Amoksisilin'in Amberlyst 15 yüzeyine adsorpsiyonunda başlangıç derişiminin giderim yüzdesi üzerine etkisi

Başlangıç Amoksisilin derişiminin Amberlyst 15 ile adsorpsiyon üzerine etkisi Çizelge 6.9'da verilmiştir. Başlangıç derişimi 50 mg/L'den 300 mg/L'ye arttırıldığında giderim yüzdesinin düzenli bir şekilde azaldığı ve %82,53 değerinden %26,10'a düştüğü görülmektedir. Buna karşılık adsorpsiyon kapasitesi, başlangıç Amoksisilin derişiminin artmasıyla yükselmiş; 50 mg/L'de 20,63 mg/g olan q_e değeri 250 mg/L'de 41,95 mg/g ile en yüksek değerine çıkmıştır. Başlangıç Amoksisilin derişiminin 300 mg/L'ye çıkarılmasıyla q_e değerinin 39,16 mg/g'a hafifçe düşmesi, Amberlyst 15'in kullanılabilir adsorpsiyon bölgelerinin yüksek Amoksisilin derişimlerinde büyük ölçüde doygunluğa ulaşmasıyla ilişkilendirilebilir. Bu sonuçlar, özellikle yüksek başlangıç derişimlerinde adsorbent üzerindeki sınırlı sayıdaki aktif bölgenin amoksisilin gideriminde belirleyici hâle geldiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, Amoksisilin derişiminin artmasıyla birlikte, Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 üzerindeki adsorpsiyondan sorumlu aktif bölgelerinin çoğunun hızlı bir şekilde işgal edilmiş ve doygunluğa ulaşmış olduğu söylenebilir (Li vd., 2021).

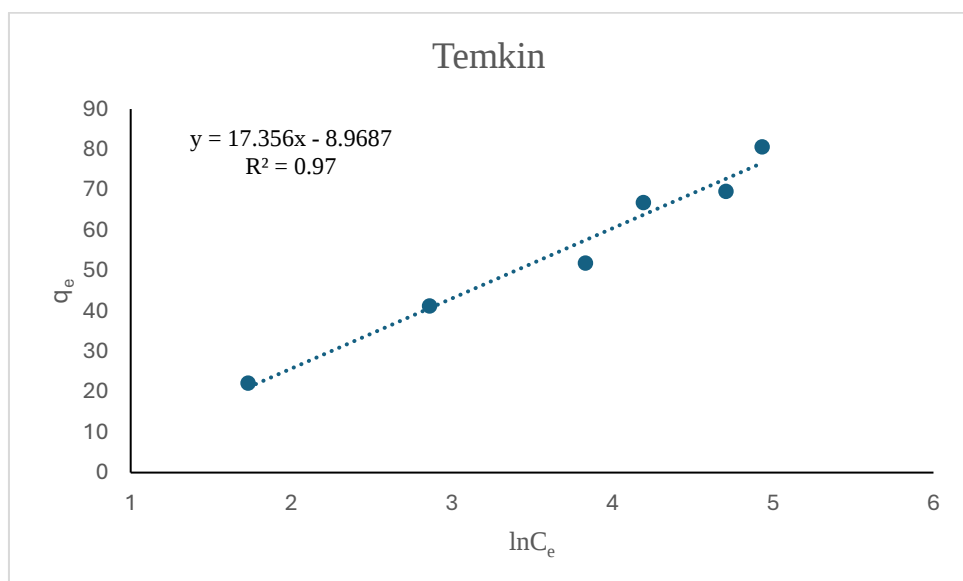
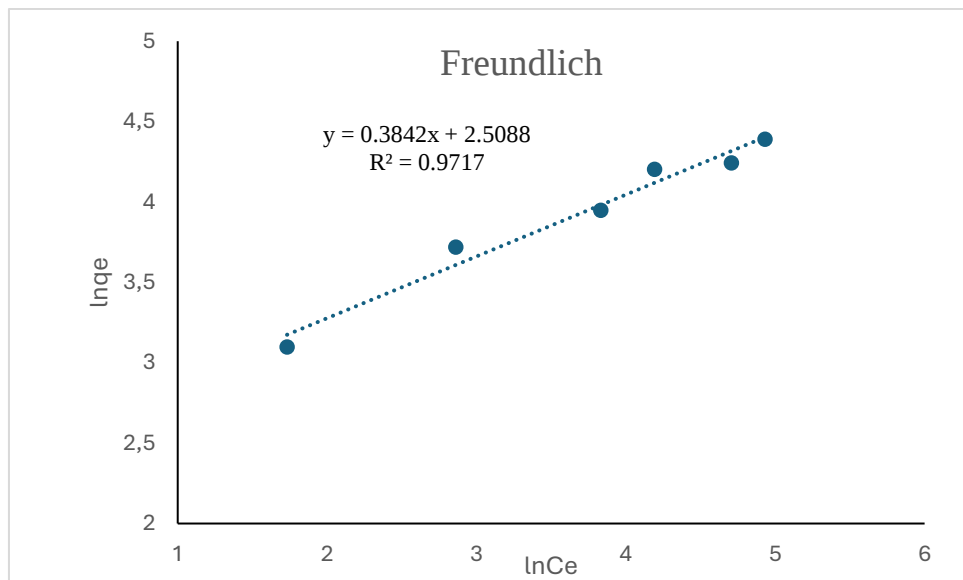
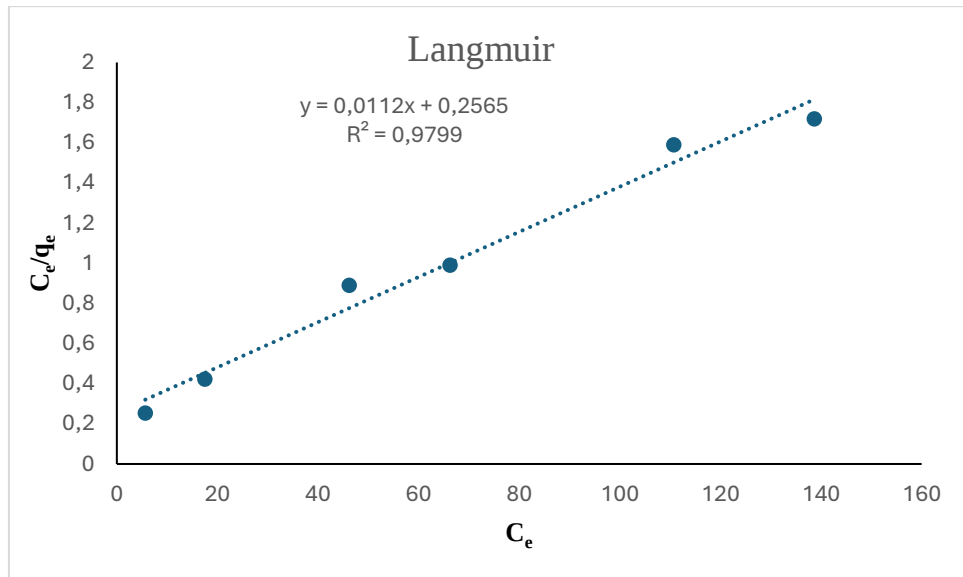
6.6. Amoksisilin Adsorpsiyonunda İzoterm İncelemeleri

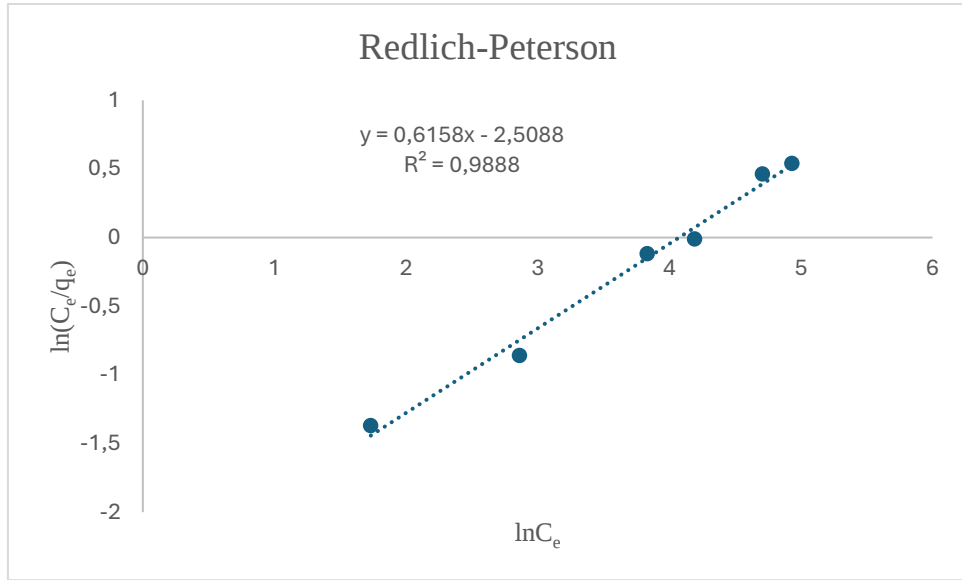
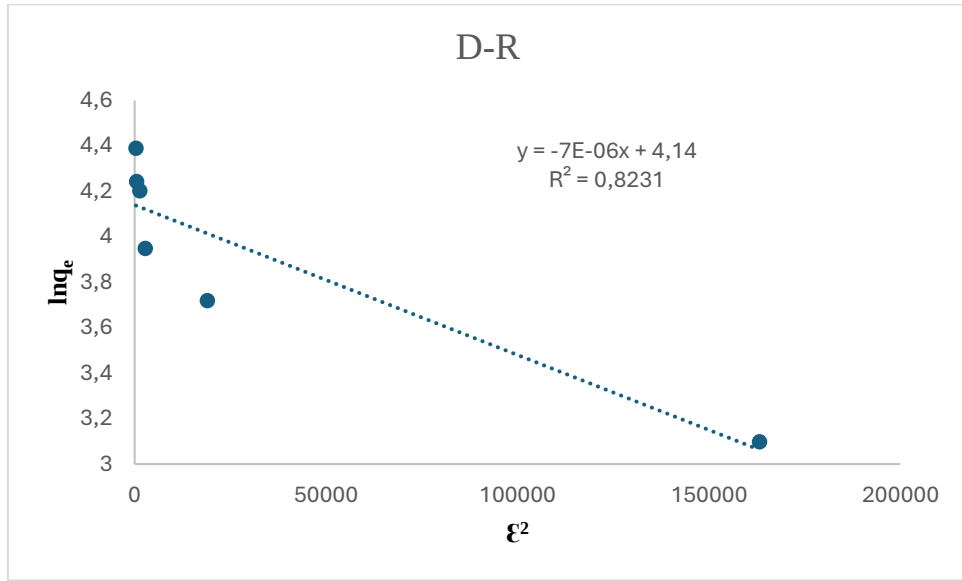
Adsorpsiyon izotermi, adsorbat içeren bir fazın adsorbentle yeterli sürede temas etmesi ve çözeltideki adsorbat derişiminin arayüz derişimiyle dengede olması durumunda dengenin kurulduğu adsorbat ve adsorbent arasındaki etkileşimi göstermektedir. Adsorpsiyon verilerinin farklı izoterm modellerine uygunluğunun incelenmesi, adsorpsiyon prosesinin tasarımı için kullanılabilecek uygun modeli bulmanın ilk adımıdır (Chayid ve Ahmed, 2015).

Henry, Redlich Peterson, Langmuir, Freundlich, Dubinin Radushkevich, Temkin, Koble Corrigan, Halsey ve Jovanovic izotermi gibi adsorpsiyon modelleri, deneysel verilerle eşleşmek ve adsorpsiyonun bileşenini (tek tabaka/çok yüzeyli veya homojen/heterojen) tahmin etmek için geliştirilmiştir (Agarwala and Mulky, 2023).

Sulu ortamdan Amoksisilin'in adsorpsiyon yöntemi ile giderimi konusunda gerçekleştirilen tez çalışmaları kapsamında adsorpsiyon izotermi adsorbent ile Amoksisilin arasındaki etkileşimlerin nasıl gerçekleştiğinin açıklanması ve adsorpsiyon mekanizmasının anlaşılması açısından yararlı olabilir. Tez kapsamında Amoksisilin'in Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 ile adsorpsiyonuna ait deneysel sonuçların Redlich Peterson, Langmuir, Freundlich, Dubinin Radushkevich ve Temkin izoterm modellerine uygunluğu incelenmiş ve izoterm modelleri ile ilgili hesaplamalar yapılmıştır.

İzoterm modellerine uygunluğun araştırılması için **Bölüm 6.5**'te yer alan ve Amoksisilin'in başlangıç derişiminin adsorpsiyon verimi üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan çalışmalara ait veriler kullanılmıştır. İlk olarak Amberlyst A21 polimerik reçinesinin adsorbent olarak kullanıldığı çalışmalarla ilgili incelemeler yapılmıştır. İzoterm modellerine ait elde edilen grafik ve eşitlikler Şekil 6.11 ve Çizelge 6.10'da verilmektedir.





Şekil 6.11. Amberlyst A21 yüzeyine Amoksisilin'in adsorpsiyonu için elde edilen izoterm grafikleri ve eşitlikleri

Çizelge 6.10. Amberlyst A21 yüzeyine Amoksisilin adsorpsiyonu için elde edilen izoterm eşitlikleri ve izoterm sabitleri

Langmuir izoterm eşitliği	R ²	K _L (L/mg)	q _m (mg/g)
y=0,0112x+0,2565	0,9799	0,044	89,29
Freundlich izoterm eşitliği	R ²	K _F	1/n
y=0,3842x+2,5088	0,9717	12,29	0,38
Temkin izoterm eşitliği	R ²	B	A _T (L/mg)
y = 17,356x – 8,9687	0,9700	17,36	0,60
Dubinin- Radushkevich İzoterm Eşitliği	R ²	β (mol ² /J ²)	q _m (mg/g)
y=-7x10 ⁻⁶ x+4,1400	0,8231	7x10 ⁻⁶	62,80
Redlich-Peterson İzoterm Eşitliği	R ²	B	A
y=0,6158x-2,5088	0,9888	0,62	12,29

Adsorpsiyon denge verilerinin araştırılması amacıyla Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin–Radushkevich (D–R) ve Redlich–Peterson izoterm modellerine uygunluk incelenmiş ve elde edilen izoterm parametreleri Çizelge 6.10’da verilmiştir. Literatür araştırmaları, izoterm modellerinin deneysel verilere uygunluğunun belirlenmesinde öncelikle doğrusal regresyon katsayılarının (R²) dikkate alınması gerektiğini belirtmektedir. Elde edilen R² değerleri kıyaslandığında modellerin uyumunun Redlich–Peterson (0,9888)>Langmuir(0,9799)>Freundlich(0,9717)>Temkin(0,9700)>Dubinin–Radushkevich (0,8231) şeklinde sıralandığı söylenebilir.

Langmuir modelinden R²=0,9799, Langmuir denge sabiti K_L=0,044 ve maksimum tek tabaka adsorpsiyon kapasitesi olarak ifade edilen q_m=89,29 mg/g olarak hesaplanmıştır. Langmuir modelinin yüksek R² değeri, adsorpsiyonun önemli ölçüde Langmuir yaklaşımıyla açıklanabildiğini göstermektedir.

Freundlich izoterm modeli için R²=0,9717, K_F=12,29 ve 1/n=0,38 değerleri elde edilmiştir. Freundlich modeli heterojen yüzeylerde gerçekleşen adsorpsiyonu ifade eden ampirik bir modeldir. Özellikle 1/n değerinin adsorpsiyonun elverişliliğinin değerlendirilmesinde önemli olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada 1/n değerinin 0 ile 1 arasında (0,38) bulunması, adsorpsiyonun incelenen Amoksisilin derişim aralığında elverişli olduğunu göstermektedir. Freundlich modelinin Langmuir modeline yakın bir R² değerine sahip olması da yüzey heterojenliğinin Amoksisilin’in adsorpsiyon davranışına katkısını açıklamaktadır (Salih vd., 2022).

Temkin izoterm modeli için yüksek bir korelasyon katsayısı elde edilmiş ve B=17,36 ile A_T=0,60 değerleri hesaplanmıştır. Temkin izoterm modeli, adsorbat–adsorbent etkileşimlerini göz

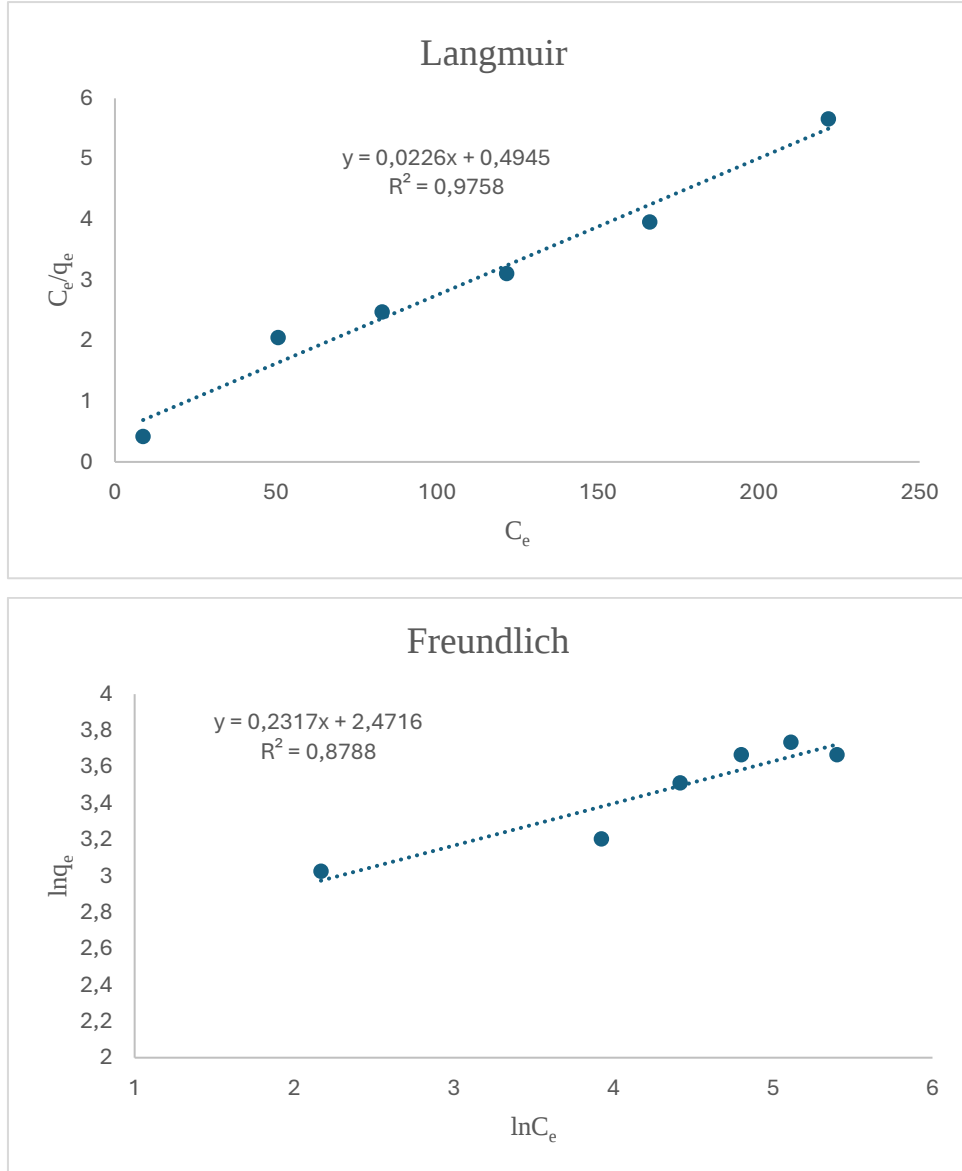
önüne almakta ve adsorbent yüzeyindeki adsorpsiyondan sorumlu aktif bölgelerin adsorbat molekülü tarafından örtülmesiyle adsorpsiyon ısısının doğrusal olarak azaldığını varsaymaktadır. Modelin deneysel verilere yüksek uyum göstermesi, Amoksisilin ile Amberlyst A21 yüzeyi arasındaki etkileşimlerin adsorpsiyon sürecinde önemli bir rol oynadığını düşündürmektedir. Bu kapsamda, Amoksisilin molekülünde ve adsorbent yüzeyinde bulunan iyonlaşabilen fonksiyonel gruplar arasında ortaya çıkabilecek iyonik/elektrostatik etkileşimlerin adsorpsiyona katkı sağladığı değerlendirilebilir. Özellikle çözelti pH'sına bağlı olarak Amberlyst A21 yüzey yükünün ve Amoksisilin'in iyonlaşma durumunun değişmesi, bu tür etkileşimlerin şiddetini ve dolayısıyla adsorpsiyon davranışını etkileyebilir (Arévalo-Fester ve Briceno, 2023).

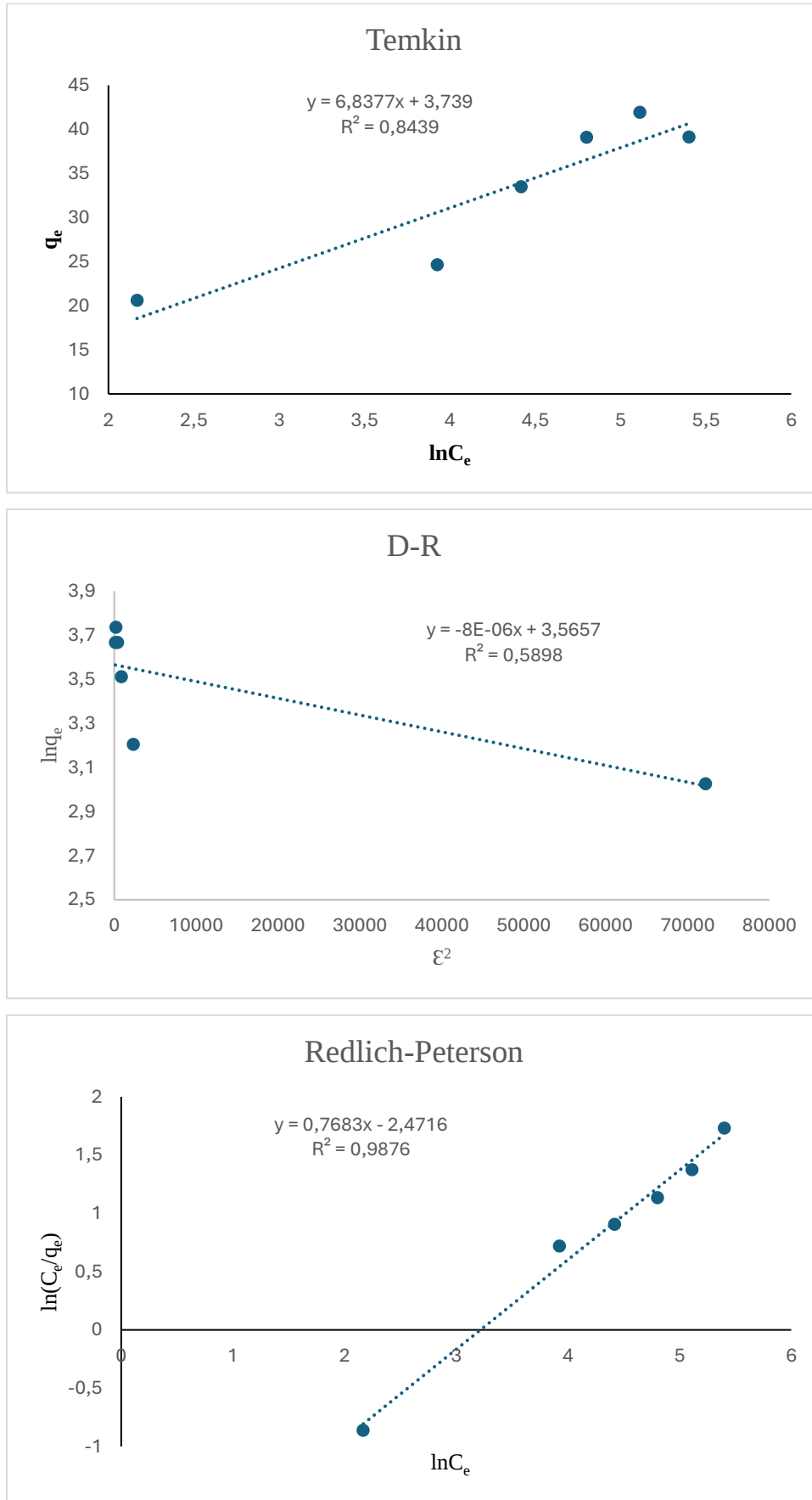
Dubinin–Radushkevich izoterm modeli için R^2 değeri 0,8231 olarak elde edilmiş olup, incelenen modeller arasında deneysel verilere en düşük uyumu bu model göstermiştir. D–R izoterm modelinden hesaplanan teorik adsorpsiyon kapasitesi q_m değeri 62,80 mg/g'dır. Bu değer Langmuir modelinden elde edilen 89,29 mg/g değerine göre daha düşüktür. D–R modelinin diğer tüm izoterm modellerine kıyasla belirgin bir şekilde düşük korelasyon katsayısına sahip olması, bu modelin Amoksisilin'in Amberlyst A21 yüzeyinde adsorpsiyonu için mevcut deneysel verileri yeterli düzeyde temsil etmediğini göstermektedir.

Tüm izoterm modellerine ait korelasyon katsayıları dikkate alındığında, deneysel adsorpsiyon verilerinin en iyi Redlich–Peterson izoterm modeline ($R^2=0,9888$) uyduğu görülmektedir. Redlich–Peterson modeli, Langmuir ve Freundlich izotermelerinin özelliklerini bir araya getiren üç parametrelili ampirik bir modeldir ve ideal tek tabakalı adsorpsiyon varsayımıyla sınırlı değildir. Bu nedenle Redlich–Peterson modelinin deneysel verilere daha yüksek uyum göstermesi, incelenen adsorpsiyon sisteminin yalnızca homojen ve ideal bir yüzey davranışıyla açıklanamayabileceğini ve yüzeyin sahip olduğu heterojenliğin de adsorpsiyon prosesine katkıda bulunabileceğini düşündürmektedir. Redlich–Peterson izoterm modelinin deneysel verilere en yüksek uyumu göstermesi ve hem Freundlich hem de Langmuir modellerinin yüksek R^2 değerlerine sahip olması, adsorpsiyon sürecinin ideal olarak yalnızca heterojen veya yalnızca homojen yüzey varsayımıyla açıklanmasının güç olduğunu ifade etmektedir. Buna göre Amberlyst A21 yüzeyinde farklı enerjiye sahip adsorpsiyondan sorumlu bölgelerinin bulunabileceği, ancak tek tabakalı adsorpsiyonun da süreçte önemli bir rol oynadığı söylenebilir (Harja vd., 2022).

Amberlyst A21 ile Amoksisilin adsorpsiyonu için Langmuir modelinden elde edilen 89,29 mg/g maksimum adsorpsiyon kapasitesi adsorbentin Amoksisiline karşı dikkate değer bir adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu ortaya koyarken, Freundlich modelinden $1/n=0,38$ değerinin elde edilmesi adsorpsiyonun elverişli olduğunu desteklemektedir.

İkinci olarak Amberlyst 15 polimerik reçinesinin adsorbent olarak kullanıldığı çalışmalarla ilgili incelemeler yapılmıştır. İzoterm modellerine ait elde edilen grafik ve eşitlikler Şekil 6.12 ve Çizelge 6.11’de verilmektedir.





Şekil 6.12. Amberlyst 15 yüzeyine Amoksisilin'in adsorpsiyonu için elde edilen izoterm grafikleri ve eşitlikleri

Çizelge 6.11. Amberlyst 15 yüzeyine Amoksisilin adsorpsiyonu için elde edilen izoterm eşitlikleri ve izoterm sabitleri

Langmuir izoterm eşitliği	R ²	K _L (L/mg)	q _m (mg/g)
y=0,0226x+0,4945	0,9758	0,046	44,25
Freundlich izoterm eşitliği	R ²	K _F	1/n
y=0,2317x+2,4716	0,8788	11,84	0,23
Temkin izoterm eşitliği	R ²	B	A _T (L/g)
y=6,8377x+3,739	0,8439	6,84	1,73
Dubinin- Radushkevich İzoterm Eşitliği	R ²	β (mol ² /J ²)	q _m (mg/g)
y=-8x10 ⁻⁶ x+3,5657	0,5898	8x10 ⁻⁶	35,36
Redlich-Peterson İzoterm Eşitliği	R ²	B	A
y=0,7683x-2,4716	0,9876	0,768	11,84

Amberlyst 15 yüzeyinde Amoksisilin adsorpsiyonuna ait denge verilerinin Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin–Radushkevich ve Redlich–Peterson izoterm modellerine uygulanması sonucunda regresyon katsayıları dikkate alındığında Langmuir izotermine ait değer oldukça yüksektir. Dolayısı ile adsorpsiyonun önemli ölçüde Langmuir modeliyle açıklanabildiğini göstermektedir. Bu model yardımı ile maksimum teorik adsorpsiyon kapasitesi q_m=44,25 mg/g ve Langmuir denge sabiti K_L=0,046 olarak hesaplanmıştır.

Amberlyst 15 ile Amoksisilin adsorpsiyonuna ait deneysel çalışma sonuçlarının Langmuir izoterm modeli ile uyumlu olması sonucu aşağıdaki varsayımlar söylenebilir (Agarwala ve Mulky, 2023):

- Amberlyst 15 polimerik reçinesinin adsorpsiyondan sorumlu her dinamik bölge yalnızca bir Amoksisilin molekülünü kabul eder.
- Amoksisilin molekülleri kullanılan polimerik adsorbentler üzerinde açıkça tanımlanmış sınırlayıcı konumlarda adsorbe edilir ve bu konumların tam olarak işgal edilmesi homojen bir şekildedir.
- Amberlyst 15 üzerindeki adsorpsiyon konumları çok özdeş olduğundan, bitişik adsorbe edilmiş Amoksisilin molekülleri arasında hiçbir ilişki yoktur (homojen).
- Polimerik reçineler üzerindeki adsorpsiyondan sorumlu tüm konumların Amoksisilin için karşılaştırılabilir bir tercihe sahip olması gerekir ve yüzey düzleminde Amoksisilin hareketi olmamalıdır.

6.7. Amoksisilin Adsorpsiyon Kapasitelerinin Literatürde Bildirilen Farklı Adsorbentlerle Karşılaştırılması

Aşağıda verilen Çizelge 6.12’de literatürde yer alan ve farklı adsorbentler ile Amoksisilin giderimi gerçekleştirilmiş çalışmalara ait adsorpsiyon kapasitelerine ait karşılaştırmalı sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 6.12. Literatürdeki farklı adsorbent türlerine ait Amoksisilin adsorpsiyon kapasitelerinin karşılaştırılması

Adsorbent	q_m (mg/g)	İzoterm Modeli	Referans
Kitosan boncukları	8,71	Langmuir	Adriano vd., 2005
Amonyum klorür ile aktive edilmiş nar odunu bazlı aktif karbon (NAC)	437	Langmuir	Moussavi vd., 2013
Hekzadesil trimetil amonyum modifiyeli bentonit (Organo-bentonit)	26,18	Langmuir	Zha vd., 2013
Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (MWCNT)	22,9	Langmuir	Mohammadi vd., 2015
Asma Odunu Bazlı Aktif Karbon Nanopartikül (NaOH)	2,69	Langmuir	Pouretedal ve Sadegh, 2014
<i>Arundo Donax</i> Bazlı Mikrodalga Aktif Karbon (KOH, 620W)	345,4	Sips	Chayid ve Ahmed, 2015

Manyetik Grafen Oksit Nanokompoziti (MGO / Fe ₃ O ₄ @GO)	372,4	Langmuir	Moradi, 2015
Tartarik Asit Modifiye Buğday Tanesi (%20)	31,25	Temkin	Boukhelkhal vd., 2016
Manyetik olarak modifiye edilmiş grafen nanolevhalar (M-GNP)	106,38	Langmuir/Temkin	Kerkez-Kuyumcu vd., 2016
Guava Çekirdeği Bazlı Aktif Karbon	570,48	Redlich-Peterson	Pezoti vd., 2016
Hurma Çekirdeği Bazlı Aktif Karbon (CO ₂ Aktivasyon, AC2)	424,3	Langmuir/Sips	Belhachemi ve Djelaila, 2017
<i>Azolla Filiculoides</i> Bazlı Aktif Karbon (ZnCl ₂ , 600°C)	265,2	Langmuir	Balarak vd., 2017
Granüler Aktif Karbon (Ticari, GAC)	4,4	Sips	Espina de Franco vd., 2017
ZnO Kaplı Karbon Nanofiber Kompozit (ZnO@CNF)	156	Langmuir	Chaba ve Nomngongo, 2019

Manyetik Kompozit Adsorbent (Fe ₃ O ₄ /Zeytin Çekirdeği, Sonokimyasal)	238,1	Langmuir	Jafari vd., 2019
Brezilya Fındığı Kapsülü Bazlı Aktif Karbon (600-700°C)	454,7 mg/g (45 °C)	Liu	Lima vd., 2019
Kaolinit kili	26	Freundlich	El Azzouzi vd., 2022
ZnO Nanopartikül Kaplı Antep Fıstığı Kabuğu Kompozit (CPS)	163	Langmuir	Mohammed vd., 2022
Kahve atığı bazlı aktif karbon	370	Langmuir/ Sips	Laksaci vd., 2023
Karboksimetil kitre zımkı- polianilin/manyetik demir oksit bionanokompoziti (CMT-g-PANI@Fe ₂ O ₃)	909,09	Freundlich	Mosavi vd.,2023
Pirinç Kabuğu Bazlı Silika Nanopartikül (Sol-Gel)	99,8	Langmuir / Temkin	Elnazer vd., 2024

Aminoetilaminoetil-fenetil- trimetoksisilan Fonksiyonlu Oyuk Silika Küre (AP-NHSS)	384,6	Langmuir	Alshehri vd., 2025
Amberlyst A21	89,29	Redlich-Peterson	Mevcut tez çalışması
Amberlyst 15	44,25	Langmuir	Mevcut tez çalışması

Farklı adsorbentler kullanılarak Amoksisilin'in giderimine yönelik literatürde bildirilen q_m değerleri incelendiğinde, kullanılan adsorbent türünün yapısına, sahip olduğu yüzey özelliklerine ve uygulanan aktivasyon/modifikasyon işlemlerine bağlı olarak oldukça geniş bir aralıkta değişen değerlerin elde edildiği görülmektedir. Literatürde yer alan q_m değerleri ticari granüler aktif karbon için 4,4 mg/g gibi düşük bir değerden, CMT-g-PANI@Fe₂O₃ biyonanokompoziti için 909,09 mg/g'a kadar ulaşmaktadır. Bu geniş aralık, adsorpsiyon kapasitesinin yalnızca adsorbat iyonunun/molekülünün özelliklerine değil; kullanılan adsorbentin tanecik boyutu, gözenek yapısı, özgül yüzey alanı, yüzey fonksiyonel grupları ve özellikle yüzey yüküne bağlıdır. Ayrıca çözelti pH'ı, sıcaklık, başlangıç adsorbat derişimi, adsorbent miktarı ve temas süresi gibi deneysel parametrelere de önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle farklı literatür çalışmalarında bildirilen q_m değerlerinin doğrudan karşılaştırılmasında deneysel parametreler arasındaki farklılıkların göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Mevcut tez çalışmasında Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 için maksimum adsorpsiyon kapasiteleri sırasıyla 89,29 mg/g ve 44,25 mg/g olarak hesaplanmıştır. Amberlyst A21 için elde edilen 89,29 mg/g'lık kapasite; kitosan boncukları (8,71 mg/g), organo-bentonit (26,18 mg/g), çok duvarlı karbon nanotüpler (22,9 mg/g), tartarik asitle modifiye edilmiş buğday tanesi (31,25 mg/g), ticari granüler aktif karbon (4,4 mg/g) ve kaolinit (26 mg/g) için bildirilen değerlerden daha yüksektir. Ayrıca pirinç kabuğu bazlı silika nanopartikülleri için bildirilen 99,8 mg/g ve manyetik grafen nanoplatelet nanokompoziti için bildirilen 106,38 mg/g değerlerine görece yakın bir adsorpsiyon kapasitesi göstermektedir.

Amberlyst 15 için belirlenen 44,25 mg/g maksimum adsorpsiyon kapasitesi ise Amberlyst A21'e göre daha düşüktür. Bununla birlikte bu değer de kitosan boncukları, çok duvarlı karbon nanotüpler, organo-bentonit, kaolinit ve tartarik asitle modifiye edilmiş buğday tanesi gibi bazı adsorbentler için bildirilen maksimum adsorpsiyon kapasitelerinden daha yüksektir. Dolayısıyla Amberlyst 15'in Amoksisilin adsorpsiyonu açısından kullanılabilir bir kapasiteye sahip olduğu, ancak aynı deneysel sistemde Amberlyst A21'in daha yüksek maksimum adsorpsiyon kapasitesi sağladığı görülmektedir.

Adsorpsiyon süreçleri söz konusu olduğunda hem fizikokimyasal hem de sterik faktörler kritik bir öneme sahiptir. Adsorpsiyon izotermi, Amoksisilin adsorpsiyonunun termodinamik özelliklerini incelemek için de kullanılabilir. Bununla birlikte, farklı adsorpsiyon izotermi uyuğunluğu incelendikten sonra, adsorbe edilen Amoksisilin'in denge adsorpsiyonunda yer alan fazlarda (sıvı-katı faz) nasıl dağıldığını belirtmek mümkün olabilir (Maghsoudi ve Khajeh-Amiri, 2025).

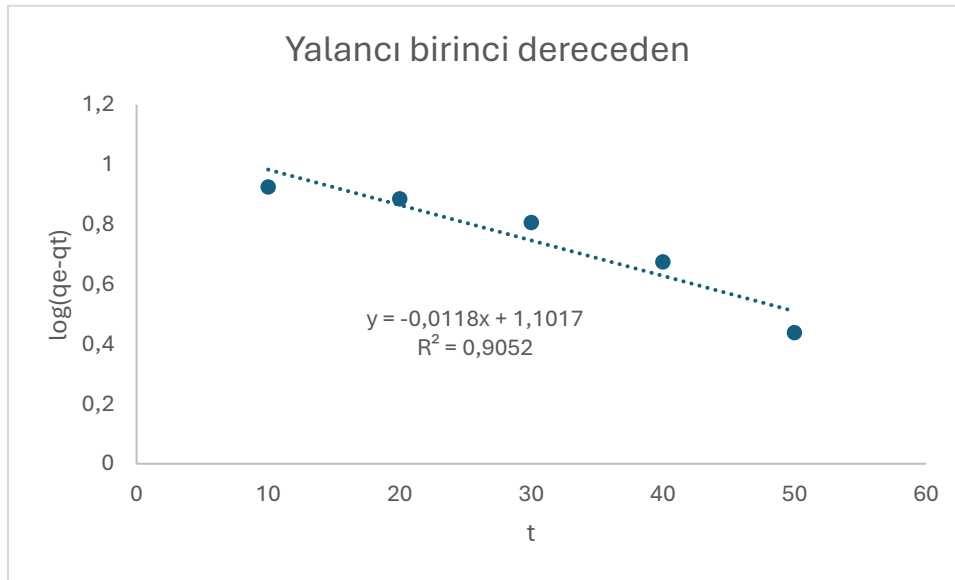
6.8. Adsorpsiyon Kinetik İncelemeleri

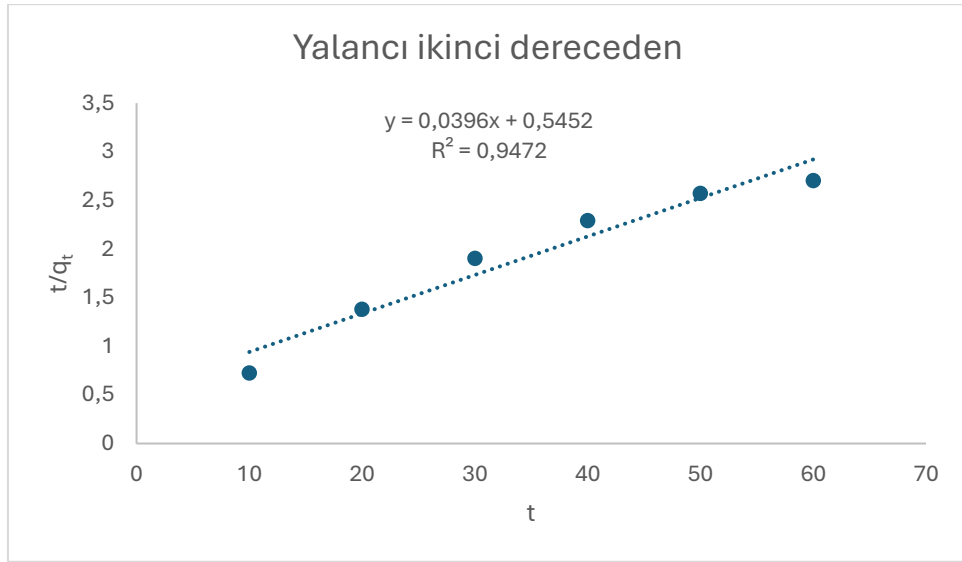
Adsorpsiyon mekanizmasının incelenmesi, adsorpsiyon hızının belirlenmesi ve Amoksisilin adsorpsiyonu için Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 adsorbentlerinin maksimum adsorpsiyon kapasitelerinin hesaplanması için adsorpsiyon kinetikleri araştırılmıştır. Bu amaçla çok iyi bilinen iki kinetik modellemesi; yalancı (Pseudo) birinci dereceden ve yalancı ikinci dereceden kinetik modelleri aşağıda verilen eşitliklere göre analiz edilmiş ve kullanılmıştır.

$$\log(qe - qt) = \log(qe) - \frac{K_1}{2,303} t \quad (D.11)$$

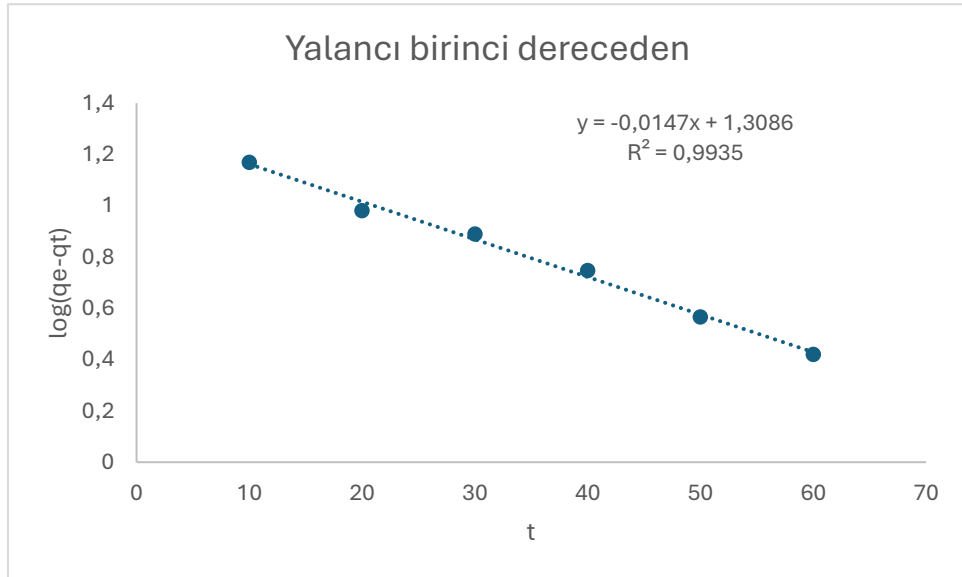
$$\frac{t}{qt} = \frac{t}{qe} + \frac{1}{K_2 qe^2} \quad (D.12)$$

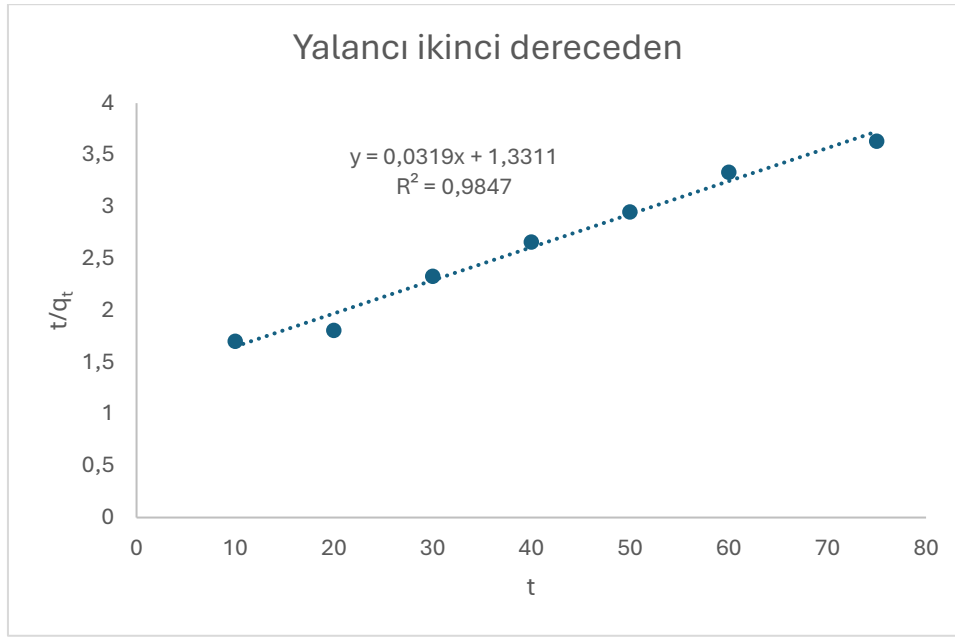
Amoksisilin'in Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 polimerik reçineleri kullanılarak adsorpsiyonuna ait kinetikler yukarıda formülleri verilen yalancı (pseudo) birinci ve yalancı (pseudo) ikinci dereceden kinetik modelleri kullanılarak incelenmiştir. Her iki adsorbent için 25 °C 'de, pH 4'te 50 mg/L'lik başlangıç Amoksisilin derişimleri ile yapılan giderim çalışmalara ait veriler kullanılmış ve hesaplanan sonuçlar Çizelge 6.13'te sunulmuştur. Elde edilen adsorpsiyon kinetiklerine ait grafikler ise Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'te verilmiştir.





Şekil 6.13. Amberlyst A21 yüzeyine Amoksisilin adsorpsiyonu için kinetik modelleri





Şekil 6.14. Amberlyst 15 yüzeyine Amoksisilin adsorpsiyonu için kinetik modelleri

Çizelge 6.13. Amoksisilin adsorpsiyonu için elde edilen kinetik verileri

C ₀ (mg/L)	q _e deneysel	Yalancı birinci dereceden			Yalancı ikinci dereceden		
		q _e teorik	K ₁ (dk ⁻¹)	R ²	q _e teorik	K ₂ (g/mg dk)	R ²
Amberlyst A21							
50	22,18	12,64	0,0272	0,9052	25,25	2,88x10 ⁻³	0,9472
Amberlyst 15							
50	20,63	20,35	0,0339	0,9935	31,35	7,74x10 ⁻⁴	0,9847

Çizelge 6.13'te, Amoksisilin'in Amberlyst A21 ve Amberlyst 15 üzerine adsorpsiyonuna ait kinetik verilerin yalancı birinci dereceden ve yalancı ikinci dereceden kinetik modellere uygunluğu verilmiştir. Kinetik modelin uygunluğunun değerlendirilmesinde korelasyon katsayısının (R²) yanı sıra, modelden hesaplanan teorik adsorpsiyon kapasitesinin (q_{e,teorik}) deneysel olarak belirlenen adsorpsiyon kapasitesine (q_{e,deneysel}) yakınlığı da dikkate alınmıştır.

Amberlyst A21 için deneysel adsorpsiyon kapasitesi 22,18 mg/g olarak belirlenmiştir. Yalancı birinci dereceden kinetik model için R^2 değeri 0,9052 olmasına rağmen, bu modelden hesaplanan teorik q_e değerinin 12,64 mg/g olması deneysel değerle oldukça büyük bir farklılık göstermektedir. Dolayısıyla, görece yüksek R^2 değerine karşın yalancı (pseudo) birinci dereceden modelin Amberlyst A21 üzerindeki Amoksisilin adsorpsiyonunu yeterli düzeyde temsil etmediği söylenebilir. Yalancı ikinci dereceden modelde ise R^2 değeri 0,9472 olarak hesaplanmış ve teorik q_e değeri 25,25 mg/g olarak bulunmuştur. Bu değer, deneysel olarak elde edilen 22,18 mg/g değerine yalancı birinci dereceden modelde hesaplanan değere kıyasla çok daha yakındır. Bu nedenle Amberlyst A21 için adsorpsiyon kapasitesinin deneysel değerle uyumu açısından yalancı ikinci dereceden modelin adsorpsiyon davranışını daha gerçekçi şekilde temsil ettiği değerlendirilebilir.

Amberlyst 15 yüzeyinde Amoksisilin adsorpsiyonunun kinetik davranışı, yalancı birinci ve yalancı ikinci derece kinetik modeller kullanılarak değerlendirilmiştir. Çizelgede verilen sonuçlara göre deneysel denge adsorpsiyon kapasitesi 20,63 mg/g olarak belirlenmiştir. Yalancı birinci derece model için teorik $q_e=20,35$ mg/g, yalancı ikinci derece model için ise teorik $q_e=31,35$ mg/g olarak hesaplanmıştır. Yalancı birinci derece modelde elde edilen teorik q_e değerinin deneysel değere oldukça yakın olması ve bu modelin daha yüksek R^2 değerine sahip bulunması, Amberlyst 15 yüzeyinde Amoksisilin adsorpsiyon kinetiğinin yalancı birinci derece model ile daha iyi temsil edildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, Amoksisilin adsorpsiyonunda Amberlyst A21'in yalancı ikinci derece, Amberlyst 15'in ise yalancı birinci derece kinetik modele daha iyi uyum gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, adsorpsiyon kinetiğinin kullanılan reçinenin yapısına bağlı olarak farklılık gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

6.9. Adsorpsiyon Termodinamiği

Amoksisilin etken maddesinin Amberlyst A21 ile adsorpsiyonuna ait termodinamik incelemeler için farklı sıcaklıklarda adsorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 298 K, 308 K ve 318 K'de 300 mg/L'lik Amoksisilin çözeltisi için belirlenen temas süreleri boyunca gerçekleştirilen adsorpsiyon sonuçları termodinamik hesaplamalar için kullanılmıştır. Adsorpsiyon denge sabiti (K_c) değerleri aşağıda verilen matematiksel formül kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen K_c değerleri Çizelge 6.14'te sunulmuştur. Amberlyst A21 polimerik reçinesinin yüzeyine Amoksisilin adsorpsiyonuna ait termodinamik hesaplamalar için $1/T$ değerlerine karşı $\ln K_c$ değerleri grafiğe geçirilmiş ve termodinamik parametreler hesaplanmıştır.

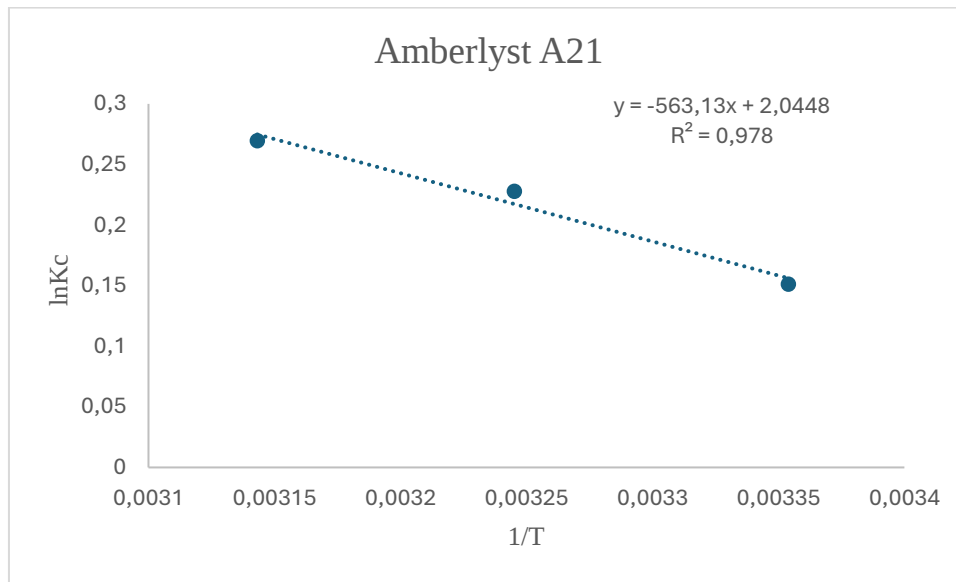
$$\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T\Delta S^{\circ} \quad (F.7)$$

$$\Delta G^{\circ} = -RT\ln K_c \quad (F.8)$$

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

Çizelge 6.14. Farklı sıcaklıklarda Amberlyst A21 İle Amoksisilin adsorpsiyonu için elde edilen K_c değerleri

Sıcaklık	298,15	308,15	318,15
K_c	1,16	1,26	1,31



Şekil 6.15. Amberlyst A21 yüzeyine Amoksisilin adsorpsiyonunun termodinamik grafiği
(pH:4, m:0,05 g, V = 0,025 L)

Amberlyst A21 yüzeyine Amoksisilin adsorpsiyonuna ait termodinamik hesaplamaları gerçekleştirmek için $1/T$ değerlerine karşı $\ln K_c$ değerleri grafiğe geçirildikten sonra (Şekil 6.15) yukarıda verilen eşitlik yardımı ile termodinamik parametreler hesaplanmıştır. Yukarıda verilen eşitliğe göre $1/T$ değerlerine karşı $\ln K_c$ değerleri grafiğe geçirildiğinde elde edilen doğrunun eğim değerinden ΔH değeri kesim noktasından ise ΔS değeri hesaplanır. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesaplanan ΔH° , ΔG° , ve ΔS° değerleri Çizelge 6.15'te verilmiştir.

Çizelge 6.15. Amberlyst A21 üzerine amoksisilin adsorpsiyonunun termodinamik parametreleri

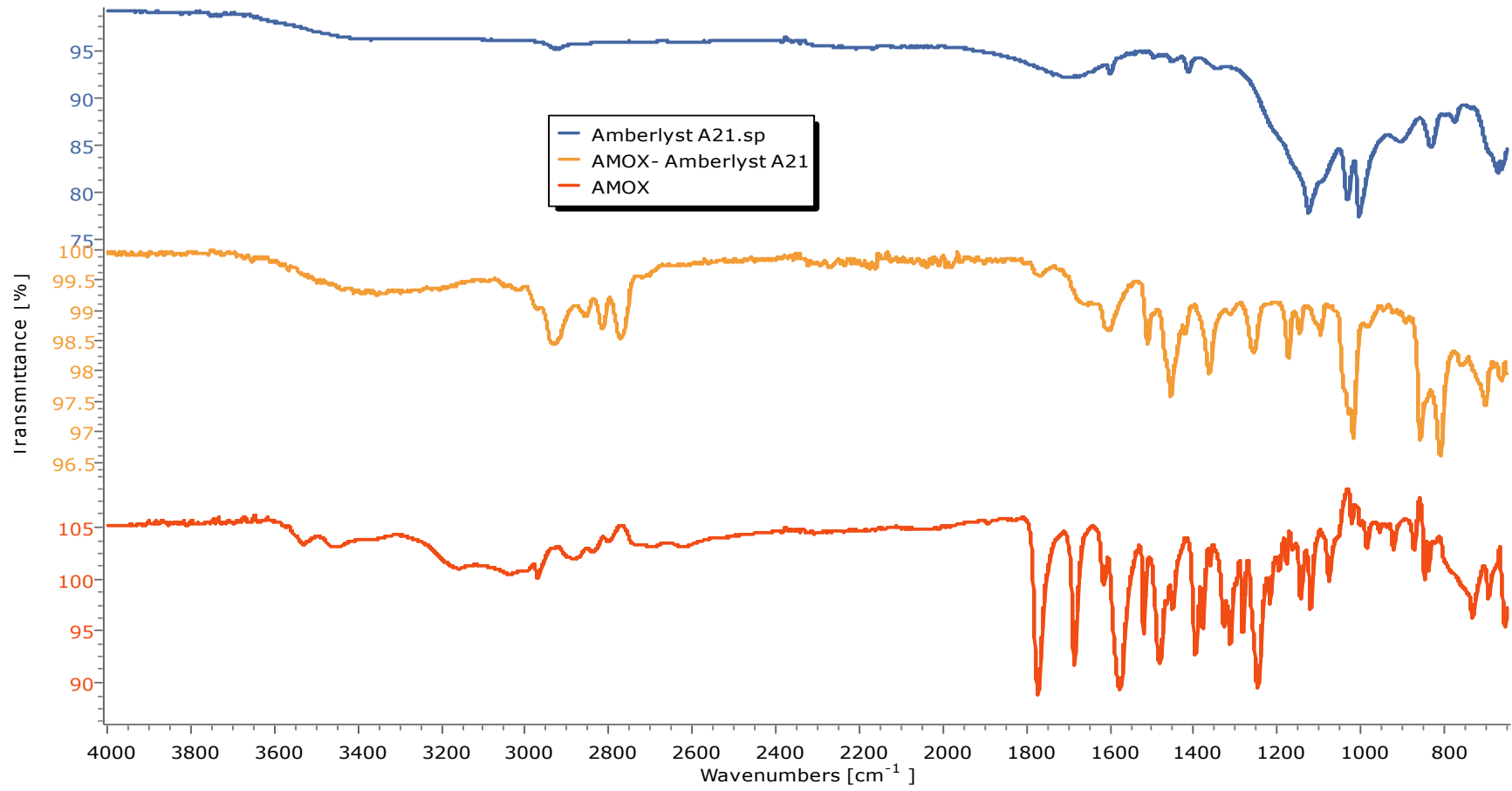
T(K)	ΔG° (kJ/mol)	ΔS° (kJ/mol.K)	ΔH° (kJ/mol)
298,15	-0,39	0,0170	4,682
308,15	-0,56		
318,15	-0,73		

Çizelge 6.15’den de görüldüğü gibi Amberlyst A21 yüzeyine Amoksisilin adsorpsiyonu için hesaplanan Gibbs serbest enerji değişimi (ΔG°) değerleri tüm sıcaklıklarda negatif olarak bulunmuştur. Gibbs serbest enerji değişimi değerlerinin negatif olması Amberlyst A21 yüzeyine Amoksisilin adsorpsiyonunun kendiliğinden gerçekleşen bir süreç olduğunu (istemli) ve termodinamik açıdan uygun olduğunu göstermektedir. Amberlyst A21 yüzeyine Amoksisilin adsorpsiyonu için hesaplanan ΔH° değeri 4,682 kJ/mol’dür. ΔH° değerinin pozitif olması adsorpsiyon prosesinin endotermik (ısı alan) bir karakterde olduğunu göstergesidir. Serbest entropi (ΔS°) değerinin pozitif (0,0170 kJ/molK) olması, adsorpsiyon prosesi esnasında katı adsorbent yüzeyi-adsorbatı içeren çözelti ara yüzeyinde rastgelelik olasılığında bir artışa işaret etmektedir (Acelas vd., 2021)

6.10. FT-IR Analizleri

FTIR metodu gibi titreşimsel spektroskopik teknikler, analitlerin moleküler yapılarının tanımlanması için basit, hızlı ve etkili bir yöntem sağlamaktadır; bu da onu farmasötik bileşenlerin ve yardımcı maddelerin analizi için etkili bir analitik araç haline getirir (Anjos vd., 2026).

Amberlyst A21 üzerine Amoksisilin adsorpsiyonunun değerlendirilmesi amacıyla adsorpsiyon prosesinden önceki Amberlyst A21 ve adsorpsiyon sonrasında elde edilen Amberlyst A21 örneğine ait FTIR spektrumları karşılaştırılmıştır. Bu spektrumlara Amoksisilin etken maddesinin FTIR spektrumu da eklenerek Şekil 6.16’da verilmiştir.



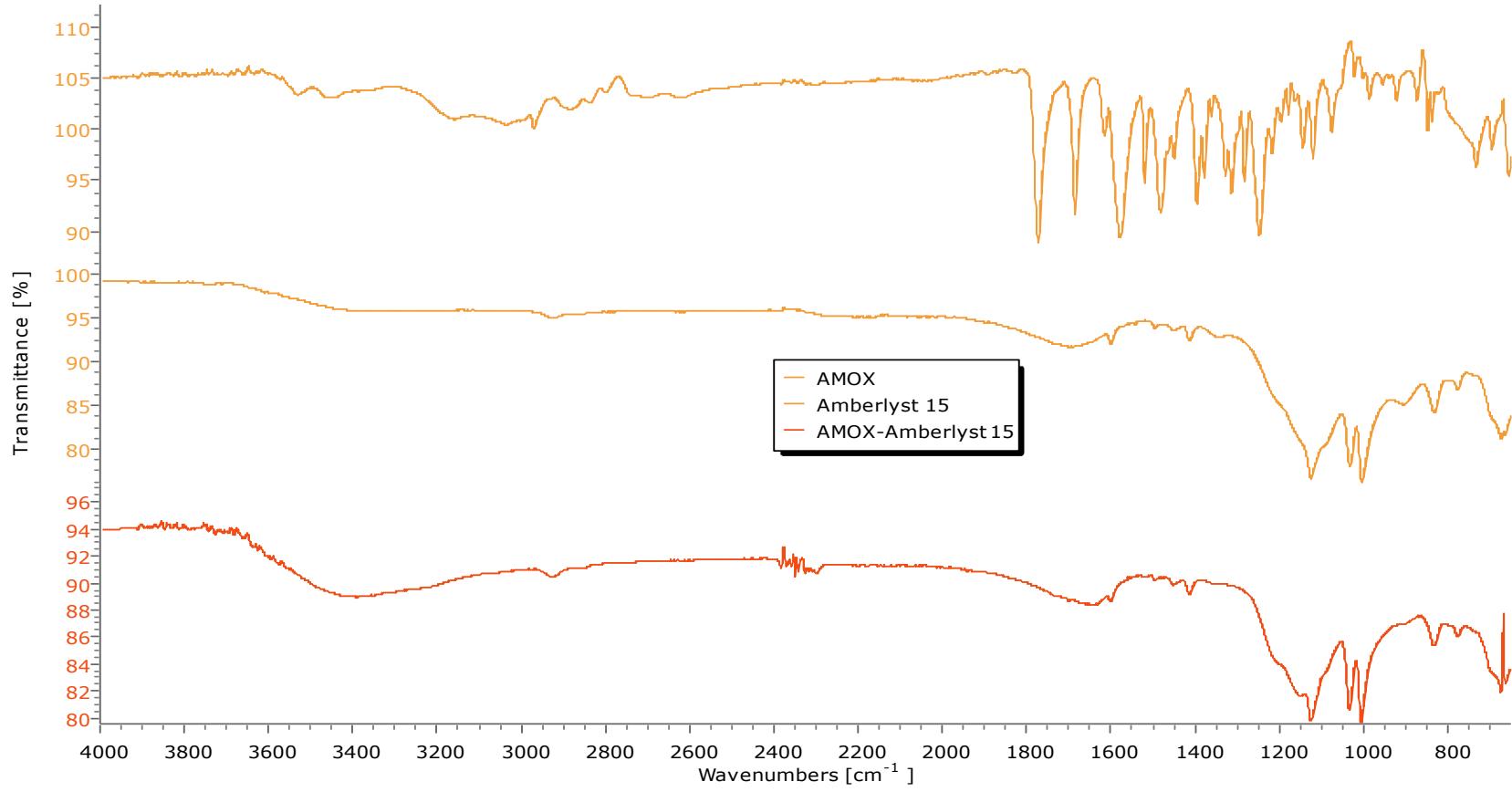
Şekil 6.16. Amoksisilin ve Amoksisilin adsorpsiyonundan önce ve sonra Amberlyst A21'e ait FTIR spektrumları

Amberlyst A21, makrogözenekli stiren-divinilbenzen esaslı bir polimerik matrise sahip zayıf bazik anyon değiştirici reçine olup aktif fonksiyonel grubu dimetilamino grubudur. Dolayısıyla reçinenin aromatik polimer iskeletinden ve yüzeyindeki amin gruplarından kaynaklanan titreşimlerin adsorpsiyon öncesi ve sonrası spektral değişimlerinin incelenmesi, Amoksisilin–reçine etkileşimlerinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Saf Amoksisilin spektrumunda çok sayıda karakteristik absorpsiyon bandı gözlenmiştir. Deneyisel spektrumda özellikle 1773, 1686 ve 1578 cm^{-1} civarında belirlenen bantlar Amoksisilin'in yapısının tanımlanması açısından önemlidir. Literatürde Amoksisilin'in β -laktam halkasına ait C=O gerilme titreşiminin yaklaşık 1770–1776 cm^{-1} , amid grubuna ait C=O titreşiminin ise yaklaşık 1680–1688 cm^{-1} bölgesinde gözleendiği bildirilmiştir. Ayrıca literatürde Amoksisilin'in amid II bandının yaklaşık 1580 cm^{-1} bulunduğu bildirilmiş olup, deneyisel spektrumda gözlenen 1578 cm^{-1} bandı da bu atama ile uyumludur.

Adsorpsiyon sonrasında elde edilen AMOX–Amberlyst A21 spektrumunda ise saf reçine spektrumuna kıyasla belirgin değişiklikler ortaya çıkmıştır. Özellikle adsorpsiyon sonrası örnekte 1605, 1510, 1455 ve 1363 cm^{-1} civarında gözlenen bantlar ve bazı bantların konum ve şiddetlerindeki değişimler, reçine yüzeyinin kimyasal çevresinin Amoksisilin varlığında değiştiğini göstermektedir. Saf Amoksisilinde 1686 cm^{-1} civarında bulunan amid karbonil bandının adsorpsiyon sonrası spektrumda yaklaşık 1695 cm^{-1} bölgesinde gözlenmesi, Amoksisilin'in karbonil içeren gruplarının çevresindeki etkileşimlerin değişmesiyle ilişkilendirilebilir. Literatürde amoksisilinin yüzeye bağlanmasının karbonil ve amid bölgelerinde FTIR kaymalarına yol açabildiği ve hidrojen bağlarının özellikle amid titreşimlerinin konumlarını etkileyebildiği gösterilmiştir. Bu nedenle gözlenen değişimler, Amoksisilin'in Amberlyst A21 yüzeyiyle etkileştiğini destekleyen spektroskopik bulgular olarak değerlendirilebilir.

FTIR sonuçları ve Amberlyst A21'in kimyasal yapısı birlikte değerlendirildiğinde, pH 4'te gerçekleşen amoksisilin adsorpsiyonunda elektrostatik etkileşimlerin yanı sıra hidrojen bağları ve polimerik reçinenin aromatik yapısıyla ilişkili hidrofobik/ π etkileşimlerinin birlikte katkı sağlaması olasıdır. Özellikle amoksisilinin $-\text{NH}_2$, $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$ ve amid/ β -laktam karbonil grupları, Amberlyst A21'in amin merkezleri ve çevresindeki kimyasal ortamla hidrojen bağı ve elektrostatik etkileşimlere katılabilecek fonksiyonel gruplardır. Amberlyst A21'in stiren-divinilbenzen esaslı makrogözenekli matrisi de organik moleküllerin yüzeyle elektrostatik olmayan etkileşimlerine katkıda bulunabilecek hidrofobik bir yapı sunmaktadır.



Şekil 6.17. Amoksisilin ve Amoksisilin adsorpsiyonundan önce ve sonra Amberlyst 15'e ait FTIR spektrumları

Amberlyst 15 üzerine Amoksisilin adsorpsiyonunun değerlendirilmesi amacıyla saf Amoksisilin, Amberlyst 15 ve adsorpsiyon sonrası elde edilen AMOX–Amberlyst 15 örneklerinin FTIR spektrumları karşılaştırılmıştır. Amberlyst 15, sülfonik asit ($-\text{SO}_3\text{H}$) fonksiyonel grupları içeren, stiren-divinilbenzen esaslı kuvvetli asidik katyon değiştirici bir reçinedir. Bu nedenle adsorpsiyon davranışında sülfonat gruplarının iyonik karakterinin önemli rol oynaması beklenmektedir (Şekil 6.17).

Saf AMOX spektrumunda özellikle yaklaşık 1770 cm^{-1} civarındaki β -laktam karbonil ($\text{C}=\text{O}$) bandı ile $1700\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ bölgesindeki karbonil, amid ve aromatik yapıya ilişkin karakteristik titreşimler belirgin olarak görülmektedir. Adsorpsiyon sonrasında elde edilen AMOX–Amberlyst 15 spektrumunun ise saf Amberlyst 15 spektrumundan bazı bölgelerde farklılaştığı görülmektedir. Özellikle $1700\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ bölgesindeki değişimler ile yaklaşık $1200\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ bölgesindeki güçlü bantların şekil ve şiddetlerindeki farklılıklar, adsorpsiyon sonrasında reçinenin fonksiyonel gruplarının kimyasal çevresinin değiştiğini göstermektedir. Amberlyst 15 için $1200\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ bölgesi özellikle önemlidir; bu bölgedeki kuvvetli absorpsiyonlar reçinenin $-\text{SO}_3\text{H}/-\text{SO}_3^-$ gruplarındaki $\text{S}=\text{O}$ ve $\text{S}-\text{O}$ titreşimleriyle ilişkilendirilmektedir.

Adsorpsiyonun pH 4'te gerçekleştirilmiş olması da bu değişimlerin yorumlanmasında önemlidir. Amoksisilin bu pH koşullarında iyonlaşabilir amino ve karboksil gruplarına sahipken, Amberlyst 15'in kuvvetli asidik sülfonik grupları büyük ölçüde iyonlaşmış $-\text{SO}_3^-$ merkezleri oluşturabilir. Bu nedenle amoksisilin protonlanmış amino grupları ile Amberlyst 15'in negatif yüklü sülfonat merkezleri arasında elektrostatik çekim/iyon değişimi adsorpsiyona katkıda bulunabilir. Bunun yanında hidrojen bağları ve reçinenin stiren-divinilbenzen matrisi ile amoksisilin aromatik yapısı arasındaki etkileşimlerin de adsorpsiyona katkı sağlaması mümkündür.

Sonuç olarak FTIR spektrumlarında adsorpsiyon sonrasında gözlenen değişimler, AMOX'un Amberlyst 15 üzerinde tutulduğunu desteklemekte ve pH 4 koşullarında sürecin özellikle iyonik/elektrostatik etkileşimlerin yanı sıra hidrojen bağı ve diğer moleküller arası etkileşimlerin ortak katkısıyla gerçekleşebileceğini düşündürmektedir.

Amoksisilin'in karakteristik bantları, tüm adsorpsiyondan sürecinden sonra çekilen adsorbentlere ait FTIR spektrumlarında gözlemlenmiştir; bu durum Amoksisilin ilaç molekülünün hem Amberlyst A21 hem de Amberlyst 15 materyallerine başarılı bir şekilde bağlandığını doğrulamıştır (Taghzouti vd., 2019).

6.11. Geri Kazanım Çalışmaları

Amberlyst A21 ve Amberlyst 15'in Amoksisilin adsorpsiyonu sonrasındaki rejenerasyon potansiyelini değerlendirmek amacıyla desorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Desorpsiyon ajanı olarak aseton kullanılmıştır. Bu amaçla Amoksisilin yüklü ve kurutulmuş adsorbentler, 0,5g g adsorbent/250 mL aseton oranında, 25 °C'de Amberlyst A21 için 60 dakika, Amberlyst 15 için 75 dakika 150 rpm hızında karıştırılmış ve işlem sonunda çözelti fazına geçen Amoksisilin miktarı belirlenerek desorpsiyon yüzdesi hesaplanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda desorpsiyon verimi Amberlyst A21 için %67,30, Amberlyst 15 için ise %51,63 olarak hesaplanmıştır. Amberlyst A21'de elde edilen daha yüksek desorpsiyon oranı, adsorplanan Amoksisilin'in bu reçine yüzeyinden aseton ortamında daha kolay uzaklaştırılabildiğini göstermektedir. Her iki adsorbentte de belirli ölçüde desorpsiyon gerçekleşmesi, adsorpsiyonun tamamen geri dönüşümsüz olmadığını ve reçinelerin rejenerasyon açısından potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Geleneksel arıtma tekniklerinin her biri, farmasötik mikrokirleticilerin uzaklaştırılmasında belirli işletme şartlarında başarı gösterse de hiçbir yöntem tek başına mutlak ve kusursuz bir çözüm teşkil etmemektedir. Örneğin, membran filtrasyon sistemleri yüksek ayırma kabiliyetlerine rağmen, ihtiyaç duyulan yüksek işletme basıncı, yoğun enerji sarfıyatı ve membran kirlenmesi (fouling) gibi ciddi teknik bariyerlerle karşı karşıyadır. Molekülleri tamamen yıkıma uğratabilen ileri oksidasyon prosesleri ise, reaktif ve enerji giderlerinin yüksekliği kadar, süreç sonunda daha toksik ara ürünlerin açığa çıkma riski nedeniyle endüstriyel ölçekte tam anlamıyla yaygınlaşamamıştır. Konvansiyonel biyolojik arıtma, ekonomik açıdan cazip bir seçenek sunsa da amoksisilin gibi biyolojik direnci yüksek antibiyotikler karşısında kararsız ve zayıf bir eliminasyon profili çizmekte; bunun da ötesinde, antibiyotik dirençli genlerin (ARG) alıcı ortamlara taşınması noktasında ciddi bir çevresel tehdit barındırmaktadır. Benzer şekilde, elektrokimyasal prosesler yüksek işletme maliyetlerine, koagülasyon/flokülasyon gibi geleneksel yöntemler ise çözünmüş haldeki farmasötik bileşiklere karşı gösterdikleri düşük giderim verimlerine takılmaktadır.

Bu genel çerçevede adsorpsiyon, diğer proseslerden net bir biçimde ayrılmaktadır. Prosesin temel avantajı yalnızca yüksek giderim kapasitesiyle sınırlı kalmayıp; sistemin geniş bir pH yelpazesinde kararlı çalışabilmesi, ilave kimyasal reaktif yükü getirmemesi, işletim ve kapasite artırımı (scale-up) konularında esneklik sunması ve en önemlisi, doğru adsorbent tasarımıyla moleküler geri kazanımı mümkün kılmasıdır (Rathi & Kumar, 2021; Sophia & Lima, 2018). Nitekim bu araştırmada adsorbent matrisleri olarak Amberlyst 15, Amberlyst A21 ve modifiye edilmiş aktif karbonun mukayeseli olarak seçilmesinin arkasında bu çok kriterli optimizasyon arayışı yer almaktadır. Amberlyst serisi iyon değiştirici reçineler, kendilerine has yüzey kimyaları ve gözenek morfolojileri sayesinde, amoksisilin gibi çözeltide iyonize olabilen farmasötik makromoleküllerle kuvvetli bağlar kurabilmektedir. Bu durum, ortamsal pH değişimlerine bağlı olarak gelişen yük varyasyonlarından faydalanılmasını ve böylece hem adsorpsiyon hem de desorpsiyon (geri kazanım) döngülerinin kontrol edilebilir bir mekanizmayla yürütülmesini sağlamaktadır (Wang vd., 2017). Diğer taraftan, modifiye aktif karbon; yüksek özgül yüzey alanı ve yüzeyindeki fonksiyonel grup çeşitliliği sayesinde hidrofobik ve elektrostatik etkileşimleri eş zamanlı olarak devreye sokabilmekte, böylece farklı reaksiyon koşullarındaki adsorpsiyon dinamiklerini analiz etmek adına güçlü bir referans noktası oluşturmaktadır (Samir vd., 2023). Sonuç olarak bu üç farklı adsorbent türünün eş zamanlı incelenmesi; sadece giderim yüzdelerini değil, aynı zamanda denge izotermelerini,

kinetik modelleri ve desorpsiyon potansiyelini de bütüncül bir perspektifle karşılaştırma zemini hazırlamaktadır.

KAYNAKÇA

- Acelas N, Lopera SM, Porras J, Torres-Palma RA. Evaluating the Removal of the Antibiotic Cephalexin from Aqueous Solutions Using an Adsorbent Obtained from Palm Oil Fiber. *Molecules*. 2021 Jun 2;26(11):3340.
- Adriano, W. S., Veredas, V., Santana, C. C., & Gonçalves, L. R. B. (2005). Adsorption of amoxicillin on chitosan beads: Kinetics, equilibrium and validation of finite bath models. *Biochemical Engineering Journal*, 27(2), 132–137.
- Agarwala, R., & Mulky, L. (2023). Adsorption of dyes from wastewater: A comprehensive review. *ChemBioEng Reviews*, 10(3), 326–335.
- Akhavan, B. J., Khanna, N. R., & Vijhani, P. (2023). Amoxicillin. *StatPearls*. StatPearls Publishing, USA.
- Al-Ghouti, M. A., & Da'ana, D. A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 393, Makale 122383.
- Aleksić, S., Žgajnar Gotvajn, A., Premzl, K., Kolar, M., ve Turk, S. Ş. (2021). Ozonation of amoxicillin and ciprofloxacin in model hospital wastewater to increase biotreatability. *Antibiotics*, 10(11), 1407.
- Alshehri, S., Shirazian, S., Pirestani, N., Soltani, R., & Soltani, S. (2025). A sustainable approach to amoxicillin removal: Eco-conscious synthesis and characterization of bi-functionalized hollow silica sphere as high-performance adsorbent and its adsorption mechanisms. *Surfaces and Interfaces*, 64, 106305.
- Anand, U., Adelodun, B., Cabrerós, C., Ballesteros, F., Jr., Kumar, P., Suresh, S., & Dey, A. (2022). Occurrence, transformation, bioaccumulation, risk and analysis of pharmaceutical and personal care products from wastewater: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(6), 3883–3904.
- Anastopoulos, I., Pashalidis, I., Orfanos, A. G., Manariotis, I. D., Tatarchuk, T., Sellaoui, L., ... & Galassi, M. (2020). Removal of caffeine, nicotine and amoxicillin from (waste)waters by various adsorbents: A review. *Journal of Environmental Management*, 261, Makale 110236.
- Anjos, O., Maria Graça Campos, Pablo Contreras Ruiz, Paulo Antunes, Application of FTIR-ATR spectroscopy to the quantification of sugar in honey, *Food Chemistry*, Volume 169, 2015, Pages 218-223
- Anirudhan, T. S., & Radhakrishnan, P. G. (2008). Thermodynamics and kinetics of adsorption of Cu(II) from aqueous solutions onto a new cation exchanger derived from tamarind fruit shell. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 40(4), 702–709.
- Arab, O., Al-Kayali, R., Khouri, A., & Haj Kaddour, S. (2023). Resistance patterns of bacterial pathogens causing lower respiratory tract infections: Aleppo-Syria. *Annals of Medicine & Surgery*, 85(6), 2655-2661.
- Aranda, F. L., & Rivas, B. L. (2022). Removal of amoxicillin through different methods, emphasizing removal by biopolymers and its derivatives. An overview. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 67(3), 5643-5654.
- Arévalo-Fester, J., & Briceño, A. (2023). Insights into selective removal by dye adsorption on hydrophobic vs multivalent hydrophilic functionalized MWCNTs. *ACS Omega*, 8(12), 11233–11250.
- Arun, S., Priyadharshini, R., Rajesh, R., & Vignesh, S. (2017). Biochar production from domestic sludge: A cost effective, recycled product for removal of amoxicillin in wastewater. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 225(1), 012164.
- Atkins, P., & de Paula, J. (2006). *Atkins' physical chemistry* (8. bs.). Oxford University Press.

- Ay, F., ve Kargi, F. (2010). Advanced oxidation of amoxicillin by Fenton's reagent treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 179(1-3), 622–627.
- Ayawei, N., Ebelegi, A. N., & Wankasi, D. (2017). Modelling and interpretation of adsorption isotherms. *Journal of Chemistry*, 2017, Makale 3039817.
- Bahr, T. M., Hassan, A. M., El Saied, M., & Abdelbary, K. M. (2026). Adsorption of cationic and anionic dyes using chemically modified activated carbon from agricultural waste. *Scientific Reports*, 16(1), Makale 20562.
- Bakhit, M., Hoffmann, T., Santer, M., Ridd, M., Francis, N., Hummers, E., ... & Del Mar, C. (2020). Comparing the quantity and quality of randomised placebo-controlled trials of antibiotics for acute respiratory, urinary, and skin and soft tissue infections: A scoping review. *BJGP Open*, 4(4), Article bjgpopen20X101082.
- Balarak, D., Kethineni, C., ve Attaolahi, M. (2019). Assessment of effective operational parameters on removal of amoxicillin from synthetic wastewater using electrocoagulation process. *Journal of Pharmaceutical Research International*, 29(1), 1–8.
- Balarak, D., Mostafapour, F. K., Akbari, H., & Joghtaei, A. (2017). Adsorption of amoxicillin antibiotic from pharmaceutical wastewater by activated carbon prepared from azolla filiculoides. *Journal of Pharmaceutical Research International*, 18(3), 1–13.
- Başar, M., & Silah, H. (2020). Adsorption of reactive Orange 16 by Amberlyst A21: Isotherm and kinetic investigations. *Turkish Journal of Analytical Chemistry*, 2(1), 22–28.
- Belaissa, Y., Saib, F., & Trari, M. (2022). Removal of amoxicillin in aqueous solutions by a chemical activated carbons derived from jujube nuts: adsorption behaviors, kinetic and thermodynamic studies. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 135, 1011–1030.
- Belhachemi, M., & Djelaila, S. (2017). Removal of amoxicillin antibiotic from aqueous solutions by date pits activated carbons. *Environmental Processes*, 4(3), 549–561.
- Benitez, F. J., Acero, J. L., Real, F. J., Roldán, G., ve Rodriguez, E. (2011). Ultrafiltration and nanofiltration membranes applied to the removal of the pharmaceuticals amoxicillin, naproxen, metoprolol and phenacetin from water. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 86(6), 858–866.
- Binson, G., Grignon, C., Le Moal, G., Lazaro, P., Lelong, J., Roblot, F., ... & Dupuis, A. (2019). Overcoming stability challenges during continuous intravenous administration of high-dose amoxicillin using portable elastomeric pumps. *PLOS ONE*, 14(8), Article e0221391.
- Bonifaz, A., Tirado-Sánchez, A., Calderón, L., Montes de Oca, G., Torres-Camacho, P., & Ponce, R. M. (2017). Treatment of cutaneous actinomycosis with amoxicillin/clavulanic acid. *The Journal of Dermatological Treatment*, 28(1), 59–64.
- Bookstaver, P. B., Bland, C. M., Griffin, B., Stover, K. R., Eiland, L. S., ve McLaughlin, M. (2015). A review of antibiotic use in pregnancy. *Pharmacotherapy*, 35(11), 1052–1062.
- Boukhelkhal, A., Benkortbi, O., Hamadache, M., Ghalem, N., Hanini, S., & Amrane, A. (2016). Adsorptive removal of amoxicillin from wastewater using wheat grains: Equilibrium, kinetic, thermodynamic studies and mass transfer. *Desalination and Water Treatment*, 57(56), 27035–27047.
- Boukhelkhal, A., Benkortbi, O., Hamadeche, M., Hanini, S., & Amrane, A. (2015). Removal of amoxicillin antibiotic from aqueous solution using an anionic surfactant. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226(10), 323.
- Brouwers, R., Vass, H., Dawson, A., Squires, T., Tavaddod, S., & Allen, R. J. (2020). Stability of β -lactam antibiotics in bacterial growth media. *PLOS ONE*, 15(7), Article e0236198.
- Bullen, J. C., Salesongsom, S., Gallagher, K., & Weiss, D. J. (2021). A revised pseudo-second-order kinetic model for adsorption, sensitive to changes in adsorbate and adsorbent concentrations. *Langmuir*, 37(10), 3189–3201.

- Burgos, J., Gómez, G., Leiva, A. M., ve Vidal, G. (2025). Effects of combined antibiotics on the biomass stability and the occurrence of antibiotic-resistant bacteria in activated sludge used for domestic wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 70, Makale 106966.
- Bush, K., & Bradford, P. A. (2016). β -Lactams and β -lactamase inhibitors: An overview. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 6(8), a025247.
- Całus-Makowska, K., Dziubińska, J., Grosser, A., ve Grobelak, A. (2025). Application of the Fenton and photo-Fenton processes in pharmaceutical removal: New perspectives in environmental protection. *Desalination and Water Treatment*, 321, Makale 100949.
- Cazetta, A. L., Vargas, A. M. M., Nogami, E. M., Kunita, M. H., Silva, T. L., & Almeida, V. C. (2011). NaOH-activated carbon of high surface area produced from coconut shell: Kinetics and equilibrium studies from the methylene blue adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 174(1), 117–125.
- Chaba, J. M., & Nomngongo, P. N. (2019). Effective adsorptive removal of amoxicillin from aqueous solutions and wastewater samples using zinc oxide coated carbon nanofiber composite. *Emerging Contaminants*, 5, 143-149.
- Chadha, R., N. Kashid, D.V. Jain, Kinetic studies of the degradation of an aminopenicillin antibiotic (amoxicillin trihydrate) in aqueous solution using heat conduction microcalorimetry, *J. Pharm. Pharmacol.* 55 (2003) 1495–1503, <https://doi.org/10.1211/0022357022179>.
- Charafi, S., Sadiq, M., Janani, F. Z., Elhalil, A., Abdennouri, M., ve Barka, N. (2025). Optimization of photocatalytic degradation of amoxicillin by ZnO-TiO₂ heterojunction under UV-Visible irradiation. *Cleaner Chemical Engineering*, 11, Makale 100183.
- Chayid, M. A., & Ahmed, M. J. (2015). Amoxicillin adsorption on microwave prepared activated carbon from arundo donax linn: Isotherms, kinetics, and thermodynamics studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(3), 1592-1601.
- Chen, C. X., Aris, A., Yong, E. L., ve Noor, Z. Z. (2021). A review of antibiotic removal from domestic wastewater using the activated sludge process: Removal routes, kinetics and operational parameters. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 67905–67923.
- Cho, H., Uehara, T., & Bernhardt, T. G. (2014). Beta-Lactam antibiotics induce a lethal malfunctioning of the bacterial cell wall synthesis machinery. *Cell*, 159(6), 1300–1311.
- Chomel, B. (2015). Lyme disease. *Revue Scientifique et Technique (International Office of Epizootics)*, 34(2), 569–576.
- Chow, A. W., Benninger, M. S., Brook, I., Brozek, J. L., Goldstein, E. J., Hicks, L. A., ... & Infectious Diseases Society of America. (2012). IDSA clinical practice guideline for acute bacterial rhinosinusitis in children and adults. *Clinical Infectious Diseases*, 54(8), e72–e112.
- Crini, G., ve Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 145–155.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., ve Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's water treatment: Principles and design* (3. bs.). John Wiley & Sons.
- Cuerda-Correa, E. M., Alexandre-Franco, M. F., ve Fernández-González, C. (2020). Advanced oxidation processes for the removal of antibiotics from water: An overview. *Water*, 12(1), Makale 102.
- Dąbrowski, A. (2001). Adsorption—from theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science*, 93(1-3), 135–224.
- DailyMed. (t.y.). *Amoxicillin capsule, tablet, and powder for suspension* [FDA reçete bilgisi]. National Institutes of Health. <https://dailymed.nlm.nih.gov/dailymed/fda/fdaDrugXsl.cfm?setid=330a6a2e-1224-557c-e054-00144ff8d46c>

- Daley, J. O., & Brizuela, M. (2026). Antibiotic prophylaxis in dental and oral surgery practice. *StatPearls*. StatPearls Publishing, USA.
- Davies, J., & Davies, D. (2010). Origins and evolution of antibiotic resistance. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 74(3), 417–433.
- de Marco, B. A., Natori, J. S. H., Fanelli, S., Tótolí, E. G., & Salgado, H. R. N. (2017). Characteristics, properties and analytical methods of amoxicillin: A review with green approach. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 47(3), 267–277.
- Deryło-Marczewska, A., & Marczewski, A. W. (2002). Effect of adsorbate structure on adsorption from solutions. *Applied Surface Science*, 196(1–4), 264–272.
- Dharmapalan, D., Bielicki, J., & Sharland, M. (2023). Harmonization of amoxicillin dose, duration, and formulation for acute childhood respiratory infections. *Antibiotics*, 12(7), 1138.
- Dimitrakopoulou, D., Rethemiotaki, I., Frontistis, Z., Xekoukoulotakis, N. P., Venieri, D., & Mantzavinos, D. (2012). Degradation, mineralization and antibiotic inactivation of amoxicillin by UV-A/TiO₂ photocatalysis. *Journal of Environmental Management*, 98, 168–174.
- Doğan, M., Alkan, M., Türkyılmaz, A., & Özdemir, Y. (2004). Kinetics and mechanism of removal of methylene blue by adsorption onto perlite. *Journal of Hazardous Materials*, 109(1–3), 141–148.
- Dolar, D., ve Košutić, K. (2013). Removal of pharmaceuticals by ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF), and reverse osmosis (RO). *Comprehensive Analytical Chemistry içinde* (Cilt 62, s. 319–344). Elsevier.
- Domínguez-Montero, L., Santana-Viera, S., Guedes-Alonso, R., Sosa-Ferrera, Z. ve Santana-Rodríguez, J. J. (2025). Working toward an environmental risk assessment of emerging contaminants in wastewater: The case of amoxicillin. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(5), s. 366.
- Dubinin, M. M., & Radushkevich, L. V. (1947). The equation of the characteristic curve of the activated charcoal. *Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, Physical Chemistry Section*, 55, 331–337.
- El Azzouzi, L., El Aggadi, S., Ennouhi, M., Ennouari, A., Kabbaj, O. K., & Zrineh, A. (2022). Removal of the amoxicillin antibiotic from aqueous matrices by means of an adsorption process using kaolinite clay. *Scientific African*, 18, e01390.
- Elnazer, W. Y., Farrag, T. E., Beheary, M. S., & Mansour, R. A. (2024). Efficient adsorption of amoxicillin onto silica nanoparticles synthesized from rice husks. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100086.
- Espina de Franco, M. A., Bonfante de Carvalho, C., Marques Bonetto, M., de Pelegrini Soares, R., & Amaral Feris, L. (2017). Removal of amoxicillin from water by adsorption onto activated carbon in batch process and fixed bed column: Kinetics, isotherms, experimental design and breakthrough curves modelling. *Journal of Cleaner Production*, 161, 947–956.
- Etebu, E., & Ariekpar, I. (2016). Antibiotics: Classification and mechanisms of action with emphasis on molecular perspectives. *International Journal of Applied Microbiology and Biotechnology Research*, 4, 90–101.
- Evans, J., Hanoodi, M., & Wittler, M. (2024). Amoxicillin clavulanate. *StatPearls*. StatPearls Publishing, USA.
- European Commission. (2015). Commission Implementing Decision (EU) 2015/495 of 20 March 2015 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council. *Official Journal of the European Union*, L78, 40–42.
- European Commission. (2018). Commission Implementing Decision (EU) 2018/840 of 5 June 2018 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of

- water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Implementing Decision (EU) 2015/495. *Official Journal of the European Union*, L141, 9–12.
- Felix, M. M., Aun, M. V., Menezes, U. P., Queiroz, G. R. S., Rodrigues, A. T., D'Onofrio-Silva, A. C., Perelló, M. I., Camelo-Nunes, I. C., ve Malaman, M. F. (2021). Allergy to penicillin and betalactam antibiotics. *einstein (São Paulo)*, 19, eMD5703.
- File, T. M., Jr. (2003). Community-acquired pneumonia. *The Lancet*, 362(9400), 1991–2001.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10.
- Gabaldón, C., Marzal, P., & Alvarez-Hornos, F. J. (2006). Modelling Cd(II) removal from aqueous solutions by adsorption on a highly mineralized peat. Batch and fixed-bed column experiments. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 81(7), 1107–1112.
- Garg, V. K., Gupta, R., Yadav, A. B., & Kumar, R. (2003). Dye removal from aqueous solution by adsorption on treated sawdust. *Bioresource Technology*, 89(2), 121–124.
- Geddes, A. M., Klugman, P. K., & Rolinson, G. N. (2007). Introduction: Historical perspective and development of amoxicillin/clavulanate. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 30(Suppl 1), S109–S112.
- Germack, M., Sedgley, C. M., Sabbah, W., & Whitten, B. (2017). Antibiotic use in 2016 by members of the American Association of Endodontists: Report of a national survey. *Journal of Endodontics*, 43(10), 1615–1622.
- Gillies, M., Ranakusuma, A., Hoffmann, T., Thorning, S., McGuire, T., Glasziou, P., ve Del Mar, C. (2015). Common harms from amoxicillin: A systematic review and meta-analysis of randomized placebo-controlled trials for any indication. *Canadian Medical Association Journal*, 187(1), E21–E31.
- Gimbert, F., Morin-Crini, N., Renault, F., Badot, P. M., & Crini, G. (2008). Adsorption isotherm models for dye removal by cationized starch-based material in a single component system: Error analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 157(1), 34–46.
- González-Pleiter, M., Gonzalo, S., Rodea-Palomares, I., Leganés, F., Rosal, R., Boltes, K., ... & Fernández-Piñas, F. (2013). Toxicity of five antibiotics and their mixtures towards photosynthetic aquatic organisms: Implications for environmental risk assessment. *Water Research*, 47(6), 2050–2064.
- Grandclément, C., Seyssieq, I., Piram, A., Wong-Wah-Chung, P., Vanot, G., Tiliacos, N., Roche, N., ve Doumenq, P. (2017). From the conventional biological wastewater treatment to hybrid processes, the evaluation of organic micropollutant removal: A review. *Water Research*, 111, 297–317.
- Grela, A., Kuc, J., & Bajda, T. (2021). A review on the application of zeolites and mesoporous silica materials in the removal of non-steroidal anti-inflammatory drugs and antibiotics from water. *Materials*, 14(17), Makale 4994.
- Gupta, S., Singh, A., Sharma, T., Kaur, R., Khandelwal, V., Rawat, K. D., Pathak, S., Sharma, M. K., Singh, J., Shah, M. P., Chauhan, S. C., Parashar, D., Shankar, P., ve Kashyap, V. K. (2024). Applications of ultrafiltration, nanofiltration, and reverse osmosis in pharmaceutical wastewater treatment. *Development in Wastewater Treatment Research and Processes: Innovative Trends in Removal of Refractory Pollutants from Pharmaceutical Wastewater içinde* (s. 33–49). Elsevier.
- Harja, M., Buema, G., & Bucur, D. (2022). Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste. *Scientific Reports*, 12(1), Makale 6087.
- Hartman-Adams, H., Banvard, C., & Juckett, G. (2014). Impetigo: Diagnosis and treatment. *American Family Physician*, 90(4), 229–235.
- Heberer, T. (2002). Occurrence, fate, and removal of pharmaceutical residues in the aquatic environment: A review of recent research data. *Toxicology Letters*, 131(1-2), 5–17.

- Hinojosa Guerra, M. M., Oller Alberola, I., Malato Rodriguez, S., Agüera Lopez, A., Acevedo Merino, A., ve Quiroga Alonso, J. M. (2019). Oxidation mechanisms of amoxicillin and paracetamol in the photo-Fenton solar process. *Water Research*, 156, 232–240.
- Hirte, K., B. Seiwert, G. Schüürmann, T. Reemtsma, New hydrolysis products of the beta-lactam antibiotic amoxicillin, their pH-dependent formation and search in municipal wastewater, *Water Res.* 88 (2016) 880–888, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.028>.
- Ho, S. (2022). Low-cost adsorbents for the removal of phenol/phenolics, pesticides, and dyes from wastewater systems: A review. *Water*, 14(20), Makale 3203.
- Ho, Y. S. (2004). Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions. *Scientometrics*, 59(1), 171–177.
- Ho, Y. S. (2006). Review of second-order models for adsorption systems. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 681–689.
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451–465.
- Homayoonfal, M., ve Mehrnia, M. R. (2014). Amoxicillin separation from pharmaceutical solution by pH sensitive nanofiltration membranes. *Separation and Purification Technology*, 130, 74–83.
- Hu, Q., & Zhang, Z. (2019). Application of Dubinin–Radushkevich isotherm model at the solid/solution interface: A theoretical analysis. *Journal of Molecular Liquids*, 277, 646–648.
- Hugonnet, J., Mengin-Lecreulx, D., Monton, A., den Blaauwen, T., Carbonnelle, E., Veckerle, C., ... & Arthur, M. (2016). Factors essential for l,d-transpeptidase-mediated peptidoglycan cross-linking and β -lactam resistance in *Escherichia coli*. *eLife*, 5, e19469.
- Humbert, G., Spyker, D. A., Fillastre, J. P., ve Leroy, A. (1979). Pharmacokinetics of amoxicillin: Dosage nomogram for patients with impaired renal function. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 15(1), 28–33.
- Huttner, A., Bielicki, J., Clements, M. N., Frimodt-Møller, N., Muller, A. E., Paccaud, J.-P., & Mouton, J. W. (2020). Oral amoxicillin and amoxicillin-clavulanic acid: Properties, indications and usage. *Clinical Microbiology and Infection*, 26(7), 871–879.
- Iqbal, J., Shah, N. S., Khan, J. A., Naushad, M., Boczkaj, G., Jamil, F., Khan, S., Li, L., Murtaza, B., ve Han, C. (2024). Pharmaceuticals wastewater treatment via different advanced oxidation processes: Reaction mechanism, operational factors, toxicities, and cost evaluation – A review. *Separation and Purification Technology*, 347, Makale 127458.
- Jafari, K., Heidari, M., & Rahmadian, O. (2018). Wastewater treatment for amoxicillin removal using magnetic adsorbent synthesized by ultrasound process. *Ultrasonics Sonochemistry*, 45, 248–256.
- Kanakaraju, D., Glass, B. D., ve Goh, P. S. (2025). Advanced oxidation process-mediated removal of pharmaceuticals from water: A review of recent advances. *Environmental Science and Pollution Research*, 32, 14316–14350.
- Karkman, A., Do, T. T., Walsh, F., ve Virta, M. P. J. (2018). Antibiotic-resistance genes in waste water. *Trends in Microbiology*, 26(3), 220–228.
- Kaur, S. P., Rao, R., & Nanda, S. (2011). Amoxicillin: A broad spectrum antibiotic. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 3(3), 30–37.
- Kerkez-Kuyumcu, Ö., Bayazit, Ş. S., & Salam, M. A. (2016). Antibiotic amoxicillin removal from aqueous solution using magnetically modified graphene nanoplatelets. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 36, 198–205.
- Khalidi-Idrissi, A., Madinzi, A., Anouzla, A., Pala, A., Mouhir, L., Kadmi, Y., ve Souabi, S. (2023). Recent advances in the biological treatment of wastewater rich in emerging pollutants produced by pharmaceutical industrial discharges. *International Journal of*

- Environmental Science and Technology*, 20, 12345–12360.
<https://doi.org/10.1007/s13762-023-04867-z>
- Khoo, Y. S., Goh, P. S., Lau, W. J., Ismail, A. F., Abdullah, M. S., Ghazali, N. H. M., Yahaya, N. K. E. M., Hashim, N., Othman, A. R., Mohammed, A., Kerisnan, N. D. A. P., Yusoff, M. A. M., Hashim, N. H. F., Karim, J., ve Abdullah, N. S. (2022). Removal of emerging organic micropollutants via modified-reverse osmosis/nanofiltration membranes: A review. *Chemosphere*, 305, Makale 135151.
- Klepáčová, K., Mravec, D., & Bajus, M. (2006). Etherification of glycerol with tert-butyl alcohol catalysed by ion-exchange resins. *Chemical Papers*, 60(3), 224–230.
- Kolasinski, K. W. (2012). *Surface science: Foundations of catalysis and nanoscience* (3. bs.). John Wiley & Sons.
- Kraemer, S. A., Ramachandran, A., & Perron, G. G. (2019). Antibiotic pollution in the environment: From microbial ecology to public policy. *Microorganisms*, 7(6), 180.
- Kumar, B., Smita, K., Sanchez, E., Stael, C., Cumbal, L., “Andean Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) shell biomass as new biosorbents for Pb²⁺ and Cu²⁺ ions”, *Ecological Engineering*, 93:152-158 (2016).
- Kushwaha, A., & Gupta, P. (2023). Amoxicillin: Mechanism of action, pharmacokinetics, and therapeutic implications in bacterial infections. *PEXACY International Journal of Pharmaceutical Science*, 2(6), 42–64.
- Kyzas, G. Z., & Matis, K. A. (2015). Nanoadsorbents for pollutants removal: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 203, 159–168.
- Lagergren, S. (1898). Zur theorie der sogenanntten adsorption gelöster stoffe [About the theory of so-called adsorption of soluble substances]. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 24(4), 1–39.
- Laksaci, H., Belhamdi, B., Khelifi, O., Khelifi, A., & Trari, M. (2023). Elimination of amoxicillin by adsorption on coffee waste based activated carbon. *Journal of Molecular Structure*, 1274, 134500.
- Langmuir, I. (1916). The constitution and fundamental properties of solids and liquids. I. Solids. *Journal of the American Chemical Society*, 38(11), 2221–2295.
- Lantos, P. M., Rumbaugh, J., Bockenstedt, L. K., Falck-Ytter, Y. T., Aguero-Rosenfeld, M. E., Auwaerter, P. G., ... & Zemel, L. S. (2021). Clinical practice guidelines by the Infectious Diseases Society of America (IDSA), American Academy of Neurology (AAN), and American College of Rheumatology (ACR): 2020 guidelines for the prevention, diagnosis, and treatment of lyme disease. *Arthritis Care & Research*, 73(1), 1–9.
- Largitte, L., & Pasquier, R. (2016). A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon. *Chemical Engineering Research and Design*, 109, 495–504.
- Li, C., Jiang, Z., Liu, Z., Dong, X., Zhu, L., & Yan, S. (2023). Drug resistance mechanism and detection method of Salmonella. *International Journal of Biology and Life Sciences*, 2(3), 57–65.
- Ligon, B. L. (2004). Penicillin: Its discovery and early development. *Seminars in Pediatric Infectious Diseases*, 15(1), 52–57.
- Lima, D. R., Lima, E. C., Umpierrez, C. S., Thue, P. S., El-Chaghaby, G. A., da Silva, R. S., ... & Biron, C. (2019). Removal of amoxicillin from simulated hospital effluents by adsorption using activated carbons prepared from capsules of cashew of pará. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(16), 16396-16408.
- Lin, K., Pan, J., Chen, Y., Cheng, R., & Xu, X. (2009). Study the adsorption of phenol from aqueous solution on hydroxyapatite nanopowders. *Journal of Hazardous Materials*, 161(1), 231–240.
- Li, Y., Shi, M., Xia, M., & Wang, F. (2021). The enhanced adsorption of ampicillin and amoxicillin on modified montmorillonite with dodecyl dimethyl benzyl ammonium

- chloride: Experimental study and density functional theory calculation. *Advanced Powder Technology*, 32(9), 3465–3475.
- Lozano, I., Cervantes-Aviles, P., Keller, A., ve Aguilar, C. L. (2023). Removal of pharmaceuticals and personal care products from wastewater via anodic oxidation and electro-Fenton processes: Current status and needs regarding their application. *Water Science & Technology*, 88(6), 1435–1452.
- Łukasiewicz, E. (2025). Coagulation–sedimentation in water and wastewater treatment: Removal of pesticides, pharmaceuticals, PFAS, microplastics, and natural organic matter. *Water*, 17(21), Makale 3048.
- Maghsoudi, A., & Khajeh-Amiri, A. (2025). Magnetically activated carbon fibers felt (MACFF) as an effective adsorbent for successful removal of cephalexin and amoxicillin from water. *Results in Chemistry*, 13, Makale 102030.
- Mahdavi, P., Siol, A., & Thöming, J. (2025). Adsorption-based removal of pharmaceutical from water: A critical review on adsorbent performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13, Makale 117520.
- Malek, A., & Farooq, S. (1996). Comparison of isotherm models for hydrocarbon adsorption on activated carbon. *AIChE Journal*, 42(11), 3191–3201.
- Matsumoto, H., Shiotani, A., & Graham, D. Y. (2019). Current and future treatment of *Helicobacter pylori* infections. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1149, 211–225.
- McKinnon, B. T., ve Avis, K. E. (1993). Membrane filtration of pharmaceutical solutions. *American Journal of Hospital Pharmacy*, 50(9), 1921–1936.
- Mohammadi, A., Kazemipour, M., Ranjbar, H., Walker, R. B., & Ansari, M. (2015). Amoxicillin removal from aqueous media using multi-walled carbon nanotubes. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 23(2), 165–169.
- Mohammed, A. A., Kareem, S. L., Peters, R. J., & Mahdi, K. (2022). Removal of amoxicillin from aqueous solution in batch and circulated fluidized bed system using zinc oxide nanoparticles: Hydrodynamic and mass transfer studies. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 17, Makale 100648.
- Montanha, M. C., Dos Santos Magon, T. F., de Souza Alcantara, C., Simões, C. F., Silva, S. R. B., Kuroda, C. M., Yamada, S. S., de Oliveira, L. E. S., Nasser, D., Junior, N. N., Mazucheli, J., Diniz, A., Paixão, P. J. P. A., ve Kimura, E. (2019). Reduced bioavailability of oral amoxicillin tablets compared to suspensions in Roux-en-Y gastric bypass bariatric subjects. *British Journal of Clinical Pharmacology*, 85(9), 2118–2125.
- Moradi, S. E. (2015). Highly efficient removal of amoxicillin from water by magnetic graphene oxide adsorbent. *Chemical Bulletin of “Politehnica” University of Timisoara, Romania Series of Chemistry and Environmental Engineering*, 60(74), 2, 1–8.
- Mosavi, S. S., Zare, E. N., Behniafar, H., & Tajbakhsh, M. (2023). Removal of amoxicillin antibiotic from polluted water by a magnetic bionanocomposite based on carboxymethyl tragacanth gum-grafted-polyaniline. *Water*, 15(1), 202.
- Moussavi, G., Alahabadi, A., Yaghmaeian, K., & Eskandari, M. (2013). Preparation, characterization and adsorption potential of the NH₄Cl-induced activated carbon for the removal of amoxicillin antibiotic from water. *Chemical Engineering Journal*, 217, 119–128.
- Mozaffari Majd, M., Kordzadeh-Kermani, V., Ghalandari, V., Askari, A., & Sillanpää, M. (2022). Adsorption isotherm models: A comprehensive and systematic review (2010–2020). *Science of The Total Environment*, 812, Makale 151334.
- Musah, M., Azeh, Y., Mathew, J. T., Umar, M. T., Abdulhamid, Z., & Muhammad, A. I. (2022). Adsorption kinetics and isotherm models: A review. *Caliphate Journal of Science & Technology*, 4(1), 20–26.

- Nadaroğlu H., Çiçek S., Güngör A.A., “Removing Trypan blue dye using nano-Zn modified Luffa sponge”, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 172:2-8 (2017).
- Nguyen, T.A.H., Ngo, H.H., Guo, W.S., Zhang, J., Liang, S., Yue, Q.Y., Li, Q., Nguyen, T.V., “Applicability of agricultural waste and by-products for adsorptive removal of heavy metals from wastewater”, *Bioresource Technology*, 148: 574- 585 (2013).
- Nishmitha, P. S., Akhilghosh, K. A., Aiswriya, V. P., Ramesh, A., & Muthuchamy, M. (2025). Understanding emerging contaminants in water and wastewater: A comprehensive review on detection, impacts, and solutions. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 18(), Makale 100755.
- Noh, J. S., & Schwarz, J. A. (1989). Estimation of the point of zero charge of simple oxides by mass titration. *Journal of Colloid and Interface Science*, 130(1), 157–164.
- Obat, R., Kipsang, N., ve Maru, M. (2022). Stability studies of reconstituted oral amoxicillin suspension (125 mg/5 mL) under different temperature storage conditions. *Journal of Research Medical and Health Sciences*, 1(1), 37–43.
- Ochoa-Muñoz, Y. H., Torres-León, J. A., Guerrero-Calderón, R. S., & Mejía de Gutiérrez, R. (2025). Rice husk-derived silica aerogels for efficient removal of amoxicillin and erythromycin from water. *Surfaces and Interfaces*, 78, Makale 108089.
- Oulebsir, A., Chaabane, T., Tounsi, H., Omine, K., Sivasankar, V., Flilissa, A., ve Darchen, A. (2020). Treatment of artificial pharmaceutical wastewater containing amoxicillin by a sequential electrocoagulation with calcium salt followed by nanofiltration. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), Makale 104597.
- Ouyang, J., Zhou, L., Liu, Z., Heng, J. Y. Y., & Chen, W. (2020). Biomass-derived activated carbons for the removal of pharmaceutical micropollutants from wastewater: A review. *Separation and Purification Technology*, 253, Makale 117536.
- Pal, R., Sarkar, T., & Khasnobis, S. (2012). Amberlyst-15 in organic synthesis. *ARKIVOC*, 2012(1), 570–609.
- Papagiannaki, D., Belay, M. H., Gonçalves, N. P. F., Robotti, E., Bianco-Prevot, A., Binetti, R., & Calza, P. (2022). From monitoring to treatment, how to improve water quality: The pharmaceuticals case. *Chemical Engineering Journal Advances*, 10, 100245
- Park, S., & Choi, K. (2008). Hazard assessment of commonly used agricultural antibiotics on aquatic ecosystems. *Ecotoxicology*, 17(6), 526–538.
- Perumal, M. K. K., Gandhi, D., Lakshminarayanan, A., Renuka, R. R., Thiagarajulu, N., & Kamaraj, C. (2024). Advanced nano-based adsorbents for purification of pharmaceutical residue polluted water: A critical review. *Process Safety and Environmental Protection*, 186, 552–565.
- Pezoti, O., Cazetta, A. L., Bedin, K. C., Souza, L. S., Martins, A. C., Silva, T. L., ... & Almeida, V. C. (2016). NaOH-activated carbon of high surface area produced from guava seeds as a high-efficiency adsorbent for amoxicillin removal: Kinetic, isotherm and thermodynamic studies. *Chemical Engineering Journal*, 288, 778–788.
- Pinheiro, C. P., Tokura, B. K., Germano, N. S., De Moraes, M. A., & Bresolin, I. T. L. (2024). *Adsorption of amoxicillin by chitosan and alginate biopolymers composite beads* **31**, 62930–62949 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35293-4>
- Pouretedal, H. R., & Sadegh, N. (2014). Effective removal of amoxicillin, cephalixin, tetracycline and penicillin g from aqueous solutions using activated carbon nanoparticles prepared from vine wood. *Journal of Water Process Engineering*, 1, 64–73.
- Pozzo, R. L., Baltanás, M. A., ve Cassano, A. E. (1997). Supported titanium oxide as photocatalyst in water decontamination: State of the art. *Catalysis Today*, 39(3), 219–231.

- Purkait, M. K., Maiti, A., DasGupta, S., & De, S. (2007). Removal of congo red using activated carbon and its regeneration. *Journal of Hazardous Materials*, 145(1–2), 287–295.
- Qiu, H., Lv, L., Pan, B. C., Zhang, Q. J., Zhang, W. M., & Zhang, Q. X. (2009). Critical review in adsorption kinetic models. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 10(5), 716–724.
- Rathi, B. S., & Kumar, P. S. (2021). Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater. *Environmental Pollution*, 280, Article 116995.
- Redlich, O., & Peterson, D. L. (1959). A useful adsorption isotherm. *The Journal of Physical Chemistry*, 63(6), 1024.
- Regmi, C., Thamaraiselvan, C., Zhu, Z., Qian, X., & Wickramasinghe, S. R. (2024). Recovery of ionic liquid from the model solution mixture mimicking the catalytically hydrolyzed cellulose product utilizing Amberlyst ion-exchange resin. *Processes*, 12(1), 55.
- Richardson, S. D., & Ternes, T. A. (2018). Water analysis: Emerging contaminants and current issues. *Analytical Chemistry*, 90(1), 398–428.
- Rios-Miguel, A. B., Jetten, M. S. M., & Welte, C. U. (2021). Effect of concentration and hydraulic reaction time on the removal of pharmaceutical compounds in a membrane bioreactor inoculated with activated sludge. *Microbial Biotechnology*, 14(4), 1707–1721.
- Rivera-Utrilla, J., Sánchez-Polo, M., Ferro-García, M. Á., Prados-Joya, G., & Ocampo-Pérez, R. (2013). Pharmaceuticals as emerging contaminants and their removal from water: A review. *Chemosphere*, 93(7), 1268–1287.
- Roa, K., Boulett, A., & Sánchez, J. A. (2026). Exploring the potential of Amberlite IRA-402 in the adsorption of emerging pharmaceutical contaminants in aqueous solution. *Surfaces and Interfaces*, 80, 108198.
- Rodríguez-González, L., Núñez-Delgado, A., Álvarez-Rodríguez, E., García-Campos, E., Martín, A., Díaz-Raviña, M., ... & Santas-Miguel, V. (2022). Effects of ciprofloxacin, trimethoprim, and amoxicillin on microbial structure and growth as emerging pollutants reaching crop soils. *Environmental Research*, 214(Part 2), Makale 113916.
- Roushree, R. R., & Haimbodi, R. (2026). Recent advances in zno-based nanocomposites for amoxicillin photocatalytic degradation and adsorption in wastewater: A review. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 36(1), 26–63.
- Rouquerol, F., Rouquerol, J., & Sing, K. (1999). *Adsorption by powders and porous solids: Principles, methodology and applications*. Academic Press.
- Ruthven, D. M. (1984). *Principles of adsorption and adsorption processes*. Wiley-Interscience.
- Salih, S. J., Abdul Kareem, A. S., & Anwer, S. S. (2022). Adsorption of anionic dyes from textile wastewater utilizing raw corncob. *Heliyon*, 8(8), Makale e10092.
- Samarghandi, M. R., Asgari, G., Shokoohi, R., Dargahi, A., & Arabkouhsar, A. (2019). Removing amoxicillin antibiotic from aqueous solutions by *Saccharomyces cerevisiae* bioadsorbent: kinetic, thermodynamic and isotherm studies. *Desalination and Water Treatment*, 152, 306–315.
- Samir, B., Bouazizi, N., Nkuigwe Fotsing, P., Cosme, J., Marquis, V., Dotto, G. L., Le Derf, F., & Vieillard, J. (2023). Preparation and modification of activated carbon for the removal of pharmaceutical compounds via adsorption and photodegradation processes: A comparative study. *Applied Sciences*, 13(14), Makale 8074.
- Sartelli, M., Guirao, X., Hardcastle, T. C., Kluger, Y., Boermeester, M. A., Raşa, K., ... & Catena, F. (2018). 2018 WSES/SIS-E consensus conference: Recommendations for the management of skin and soft-tissue infections. *World Journal of Emergency Surgery*, 13, Article 58.

- Schwarzenbach, R. P., Egli, T., Hofstetter, T. B., von Gunten, U., ve Wehrli, B. (2010). Global water pollution and human health. *Annual Review of Environment and Resources*, 35(1), 109–136. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-100809-125342>
- Sharland, M., Pulcini, C., Harbarth, S., Zeng, M., Gandra, S., Mathur, S., & Magrini, N. (2018). Classifying antibiotics in the WHO Essential Medicines List for optimal use—be AWaRe. *The Lancet Infectious Diseases*, 18(1), 18–20.
- Shih, C.-A., Wu, I.-T., Wu, D.-C., Lei, W.-Y., Tsay, F.-W., Tsai, T.-J., ... & Hsu, P.-I. (2026). Evolution of amoxicillin-based mono-antibiotic regimens for *Helicobacter pylori* eradication: From ineffectiveness to innovation—A systematic review. *Microorganisms*, 14(3), 625.
- Shulman, S. T., Bisno, L. A., Clegg, H. W., Gerber, M. A., Kaplan, E. L., Lee, G., ... & Van Beneden, C. (2012). Clinical practice guideline for the diagnosis and management of Group A Streptococcal pharyngitis: 2012 update by the Infectious Diseases Society of America. *Clinical Infectious Diseases*, 55(10), e86–e102.
- Silah, H., & Gül, Ü. D. (2018). Amberlyst A21 ile Everzol Black boyasının adsorpsiyonu: İzoterm ve kinetik çalışmalar. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(3), 1063–1070.
- Silva, S. M., Sampaio, K. A., Ceriani, R., Verhé, R., Stevens, C., De Greyt, W., & Meirelles, A. J. A. (2013). Adsorption of carotenes and phosphorus from palm oil onto acid activated bleaching earth: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Journal of Food Engineering*, 118(4), 341–349.
- Simonin, J. P. (2016). On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 300, 254–263.
- Snyder, A. S., Adham, S., Redding, A. M., Cannon, F. S., DeCarolis, J., Oppenheimer, J., Wert, E. C., ve Yoon, Y. (2007). Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals. *Desalination*, 202(1–3), 156–181.
- Souza, T. G. F., Olusegun, S. J., Galvão, B. R. L., Da Silva, J. L. F., Mohallem, N. D. S., & Ciminelli, V. S. T. (2023). Mechanism of amoxicillin adsorption by ferrihydrites: Experimental and computational approaches. *Journal of Molecular Liquids*, 373, Makale 121202.
- Sopaj, F., Rodrigo, M. A., Oturan, N., Podvorica, F. I., Pinson, J., ve Oturan, M. A. (2015). Influence of the anode materials on the electrochemical oxidation efficiency. Application to oxidative degradation of the pharmaceutical amoxicillin. *Chemical Engineering Journal*, 262, 286–294.
- Sophia A., C., & Lima, E. C. (2018). Removal of emerging contaminants from the environment by adsorption. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 150, 1–17.
- Sporsho, S. S., Saha, D., Khan, M. H., Rahman, M. S., Rukh, M., Islam, M. R., Chakma, T., Haque, F., Roy, H., Sarkar, D., & Islam, M. S. (2025). Insights into adsorbent-based pharmaceutical wastewater treatment and future developments toward sustainability. *RSC Advances*, 15(59), 50597–50632.
- Sun, C., Wang, Y., Jiang, B., Hu, S., Wang, Y., Zhang, C., Liu, F., Zhang, Y., & Li, G. (2023). Self-catalyst degradation of amoxicillin in alkaline condition driven by superoxide radical. *Chemical Engineering Journal*, 477, Makale 146942.
- Sunarto, O. A., & Mappamasing, H. (2024). Antibiotics used for erysipelas and cellulitis. *Journal of Pakistan Association of Dermatologists*, 34(4), 1041–1047.
- Sutherland, R., Croydon, E. A., & Rolinson, G. N. (1972). Amoxycillin: A new semi-synthetic penicillin. *British Medical Journal*, 3(5817), 13–16.
- Şahin, M., Mısıır, M., & Arslan, Y. (2024). Removal of amoxicillin using a new adsorbent: silver nanoparticle modified with poly(ε-caprolactone)- block- poly(L-lactide) copolymer. *Journal of Applied Polymer Science*, 142(10).

- Tan, C. W., & Chlebicki, M. P. (2016). Urinary tract infections in adults. *Singapore Medical Journal*, 57(9), 485–490.
- Taoufik, N., Boumya, W., Achak, M., Sillanpää, M., & Barka, N. (2021). Comparative overview of advanced oxidation processes and biological approaches for the removal pharmaceuticals. *Journal of Environmental Management*, 288, 112404.
- Temkin, M. I. (1940). Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalysts. *Acta Physicochimica URSS*, 12, 327–356.
- Teughels, W., Feres, M., Oud, V., Martín, C., Matesanz, P., & Herrera, D. (2020). Adjunctive effect of systemic antimicrobials in periodontitis therapy: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Clinical Periodontology*, 47(Suppl 22), 257–281.
- Thomas, W. J., & Crittenden, B. (1998). *Adsorption technology and design*. Elsevier.
- Tolkoff-Rubin, N. E., Wilson, M. E., Zuromskis, P., Jacoby, I., Martin, A. R., & Rubin, R. H. (1984). Single-dose amoxicillin therapy of acute uncomplicated urinary tract infections in women. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 25(5), 626–629.
- Tran, H. N., You, S. J., Hosseini-Bandegharai, A., & Chao, H. P. (2017). Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review. *Water Research*, 120, 88–116.
- Ullah, H., Iqbal, D., Waqar-Un-Nisa, Abid, J., Sarwar, F., Ismail, A. M., Pan, X., & Kuang, B. (2026). Adsorptive removal of emerging antibiotic contaminants from aquatic environments using magnetically modified biochar. *Toxics*, 14(400).
- U.S. Food and Drug Administration. (2015). *AMOXIL (amoxicillin) capsules, tablets, and powder for oral suspension* [Prospektüs bilgisi]. https://www.accessdata.fda.gov/drugsatfda_docs/label/2015/50542s02950754s01950760s01950761s0161bl.pdf
- UN Department of Economic and Social Affairs (SDGs). (t.y.). *Goal 6*. Erişim adresi: <https://sdgs.un.org/goals/goal6>
- UN-Water, United Nations. (t.y.). *Goal 6: Water and sanitation*. 2025, Erişim adresi: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/>
- Valour, F., Sénéchal, A., Dupieux, C., Karsenty, J., Lustig, S., Breton, P., ... & Ferry, T. (2014). Actinomycosis: Etiology, clinical features, diagnosis, treatment, and management. *Infection and Drug Resistance*, 7, 183–197.
- Víctor-Ortega, M. D., Ochando-Pulido, J. M., & Martínez-Férez, A. (2016). Phenols removal from industrial effluents through novel polymeric resins: Kinetics and equilibrium studies. *Separation and Purification Technology*, 160, 136–144.
- Vijayaraghavan, K., Padmesh, T. V., Palanivelu, K., & Velan, M. (2006). Biosorption of nickel(II) ions onto *Sargassum wightii*: Application of two-parameter and three-parameter isotherm models. *Journal of Hazardous Materials*, 133(1-3), 304–308.
- Wang, C. M., Chang, K. S., Chung, T. W., & Wu, H. (2004). Adsorption equilibria of aromatic compounds on activated carbon, silica gel, and 13X zeolite. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 49(3), 527–531.
- Wang, J., & Guo, X. (2020). Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous Materials*, 390, Makale 122156.
- Wang, T., Pan, X., Ben, W., Wang, J., Hou, P., ve Qiang, Z. (2017). Adsorptive removal of antibiotics from water using magnetic ion exchange resin. *Journal of Environmental Sciences*, 52, 111–117.
- Wang, Y., Wang, C., Huang, X., Zhang, Q., Wang, T., & Guo, X. (2024). Guideline for modeling solid-liquid adsorption: Kinetics, isotherm, fixed bed, and thermodynamics. *Chemosphere*, 349, Makale 140736.
- Wawrzekiewicz, M., & Kucharczyk, A. (2023). Adsorptive removal of direct azo dyes from textile wastewaters using weakly basic anion exchange resin. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(5), Makale 4886.

- Waxman, D. J., & Strominger, J. L. (1983). Penicillin-binding proteins and the mechanism of action of beta-lactam antibiotics. *Annual Review of Biochemistry*, 52, 825–869.
- Webb, P. A. (2003). *Introduction to chemical adsorption analytical techniques and their applications to catalysis* (Technical Publications). Micromeritics Instrument Corp.
- Weber, W. J., Jr., & Morris, J. C. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(2), 31–59.
- White, A. R., Kaye, C., Poupard, J., Pypstra, R., Woodnutt, G., & Wynne, B. (2004). Augmentin (amoxicillin/clavulanate) in the treatment of community-acquired respiratory tract infection: A review of the continuing development of an innovative antimicrobial agent. *The Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 53(Suppl. 1), i3–i20.
- Wilson, W., Taubert, K. A., Gewitz, M., Lockhart, P. B., Baddour, L. M., Levison, M., ... & Quality of Care and Outcomes Research Interdisciplinary Working Group. (2007). Prevention of infective endocarditis: Guidelines from the American Heart Association: A guideline from the American Heart Association Rheumatic Fever, Endocarditis, and Kawasaki Disease Committee, Council on Cardiovascular Disease in the Young, and the Council on Clinical Cardiology, Council on Cardiovascular Surgery and Anesthesia, and the Quality of Care and Outcomes Research Interdisciplinary Working Group. *Circulation*, 116(15), 1736–1754.
- Wilson, W. R., Gewitz, M., Lockhart, P. B., Bolger, A. F., DeSimone, D. C., Kazi, D. S., ... & American Heart Association Young Hearts Rheumatic Fever, Endocarditis and Kawasaki Disease Committee of the Council on Lifelong Congenital Heart Disease and Heart Health in the Young; Council on Cardiovascular and Stroke Nursing; and the Council on Quality of Care and Outcomes Research. (2021). Prevention of viridans group streptococcal infective endocarditis: A scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 143(20), e963–e978.
- Wolska, J., Frankowski, M., Jenczyk, J., & Wolski, L. (2024). Highly sulfonated hyper-cross-linked polymers as promising adsorbents for efficient and selective removal of ciprofloxacin from water. *Separation and Purification Technology*, 343, Makale 127147.
- Worch, E. (2012). *Adsorption technology in water treatment: Fundamentals, processes, and modeling*. De Gruyter.
- World Health Organization (2005). *The world health report 2005: Make every mother and child count*. [Erişim: 09.07.2026]
- Wu, Y., Chen, M., Lee, H. J., A Ganzoury, M., Zhang, N., ve de Lannoy, C. F. (2022). Nanocomposite polymeric membranes for organic micropollutant removal: A critical review. *ACS ES&T Engineering*, 2(9), 1574–1598.
- Yousef, R. I., El-Eswed, B., & Al-Muhtaseb, A. H. (2011). Adsorption characteristics of natural zeolites as solid adsorbents for phenol removal from aqueous solutions: Kinetics, mechanism, and thermodynamics studies. *Chemical Engineering Journal*, 171(3), 1143–1149.
- Yu, C., & Han, X. (2015). Adsorbent material used in water treatment-A review. *Proceedings of the 2015 2nd International Workshop on Materials Engineering and Computer Sciences*, 257–261.
- Zadvarzi, S. B., & Amooey, A. A. (2023). Amoxicillin and cefixime simultaneous adsorption by facile synthesized chitosan@polyacrylamide@ZIF-8: Isotherm and kinetic study. *Environmental Sciences Europe*, 35, 60.
- Zaied, B. K., Rashid, M., Nasrullah, M., Zularisam, A. W., Pant, D., ve Singh, L. (2020). A comprehensive review on contaminants removal from pharmaceutical wastewater by electrocoagulation process. *Science of the Total Environment*, 726, Makale 138095.

- Zeng, X., & Lin, J. (2013). Beta-lactamase induction and cell wall metabolism in Gram-negative bacteria. *Frontiers in Microbiology*, 4, 128.
- Zha, S. X., Zhou, Y., Jin, X., & Chen, Z. (2013). The removal of amoxicillin from wastewater using organobentonite. *Journal of Environmental Management*, 129, 569-576.
- Zhang, C., Zhao, Z., Dong, S., ve Zhou, D. (2021). Simultaneous elimination of amoxicillin and antibiotic resistance genes in activated sludge process: Contributions of easy-to-biodegrade food. *Science of the Total Environment*, 764, Makale 142907.
- Zielińska, I., Polak, D., & Szwast, M. (2021). Analysis of the adsorption of selected pharmaceuticals on a composite material PEBAX/GO. *Journal of Water Process Engineering*, 44(), Makale 102272.
- Zinicovscaia, I., ve Cepoi, L. (Ed.). (2016). *Cyanobacteria for bioremediation of heavy metals*. Springer.